



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ÍTALO LEONARDO FARIA FERREIRA

**Análise de Distorções Harmônicas em Data Centers:
da Medição em Campo ao Estudo de Acesso à Rede Básica**

Uberlândia

2026

ÍTALO LEONARDO FARIA FERREIRA

**Análise de Distorções Harmônicas em Data Centers:
da Medição em Campo ao Estudo de Acesso à Rede Básica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Dr. Ivan Nunes Santos

Uberlândia

2026

ÍTALO LEONARDO FARIA FERREIRA

**Análise de Distorções Harmônicas em Data Centers:
da Medição em Campo ao Estudo de Acesso à Rede Básica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Uberlândia, 16 de Julho de 2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivan Nunes Santos – UFU

Prof. Dr. Fabrício Augusto Matheus Moura - UFU

Prof. Dr. Arthur Costa de Souza - UNIFEI

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F383
2026 Ferreira, Ítalo Leonardo Faria, 1999-
 Análise de Distorções Harmônicas em Data Centers: da Medição
 em Campo ao Estudo de Acesso à Rede Básica [recurso eletrônico]
 / Ítalo Leonardo Faria Ferreira. - 2026.

Orientador: Ivan Nunes Santos.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.554>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Santos, Ivan Nunes, 1979-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 826, PPGEELT				
Data:	Dezesseis de julho de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	12422EEL002				
Nome do Discente:	Ítalo Leonardo Faria Ferreira				
Título do Trabalho:	Análise de Distorções Harmônicas em Data Centers: da Medição em Campo ao Estudo de Acesso à Rede Básica				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Ivan Nunes Santos. Título do Projeto: Desenvolvimento de ferramentas para otimização do planejamento da operação no contexto de complementariedade de fontes renováveis, hibridização e emprego de SAEs. Vigência do projeto: 2020-atual.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Fabrício Augusto Matheus Moura (UFU), Arthur Costa de Souza (UNIFEI) e Ivan Nunes Santos, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Ivan Nunes Santos, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Costa de Souza, Usuário Externo**, em 16/07/2026, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/07/2026, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabricio Augusto Matheus Moura, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/07/2026, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7429537** e o código CRC **4632B6F3**.

Referência: Processo nº 23117.041772/2026-37

SEI nº 7429537

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Judith Silva, querida ex-colega de trabalho peruana, pelo incentivo primordial para o início desta jornada no mestrado; à memória de meu saudoso avô, Sebastião Gonçalves; ao meu irmão, Frei Luiz Otávio, que, mesmo distante, se manteve em oração por mim; e aos meus pais, Geraldo e Márcia, cujos apoio e motivação constantes foram fundamentais para que eu trilhasse este caminho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, pela força interior que me sustentou nos momentos de cansaço e pela sabedoria concedida para transformar desafios em aprendizado ao longo de toda esta jornada.

Aos meus pais, Geraldo e Márcia, cuja dedicação e amor incondicional são a base de tudo o que sou. Obrigado por acreditarem nos meus sonhos, pelo incentivo de cada dia e por todo o apoio prestado que não dá para citar em palavras. Esta conquista também é de vocês.

Ao meu irmão, Frei Luiz Otávio, por suas orações e pelo suporte espiritual que iluminaram meus caminhos e renovaram minha fé nos momentos mais complexos desta caminhada.

Ao meu professor e orientador, Ivan Nunes Santos, manifesto meu profundo respeito e admiração. Sou imensamente grato por sua condução prestada, pela generosidade em compartilhar seu vasto conhecimento e pela confiança depositada no desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fomento essencial à pesquisa, viabilizando o suporte necessário para a dedicação integral e a execução deste projeto.

Agradeço ao Centro Avançado de Transição Energética da Universidade Federal de Uberlândia (CTE-UFU) pelo suporte à pesquisa (MCTI/FINEP/FNDCT - 0966/24 #01.25.0086.00), bem como o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo 310428/2025-4 e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos amigos e colegas, pela parceria nos laboratórios, pelas trocas de ideias que enriqueceram este estudo e pelos momentos de descontração que tornaram a rotina acadêmica muito mais leve. A todos que, com um gesto ou uma palavra de incentivo, fizeram parte desta trajetória, o meu muito obrigado.

"A vida não é fácil para nenhum de nós, mas devemos ter perseverança e, acima de tudo, confiança em nós mesmos."

Marie Curie

RESUMO

A expansão acelerada dos *data centers*, impulsionada pela ascensão da Inteligência Artificial e pela crescente demanda por serviços digitais, tem elevado de forma expressiva o consumo de energia elétrica e intensificado a preocupação com os impactos desses empreendimentos sobre a Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Em razão da natureza não linear de suas cargas, sobretudo os sistemas de alimentação ininterrupta (*UPS*) e os sistemas de climatização baseados em inversores de frequência, esses empreendimentos constituem fontes com potenciais geradores de distorções harmônicas, podendo comprometer o desempenho da rede no ponto de conexão. Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar as distorções harmônicas geradas pela operação de *data centers* e avaliar estratégias de mitigação à luz dos requisitos de acesso à Rede Básica. A metodologia adotada articula três níveis de análise: a medição em campo de uma instalação real de médio porte localizada em Uberlândia/MG, segundo as diretrizes dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) Módulo 8; a modelagem computacional das cargas lineares e não lineares no ambiente MATLAB/Simulink (versão r2025a), com base nos dados medidos; e o estudo de acesso de um complexo do tipo *hyperscale* à Rede Básica em 230 kV, conduzido no software HarmZs em conformidade com a Nota Técnica ONS NT 009/2016 (rev. 03), por meio da representação da Rede Interna por equivalente de Norton e da Rede Externa por Lugar Geométrico das admitâncias harmônicas. As medições em campo confirmaram um perfil de emissão compatível com retificadores de 6 e 12 pulsos, com todos os indicadores de QEE dentro dos limites normativos. No estudo de acesso, a configuração original apresentou violação do limite individual da 11ª ordem harmônica no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). A inserção de um filtro passivo sintonizado nessa ordem corrigiu a inconformidade inicial, porém provocou amplificação da 3ª ordem por efeito de ressonância paralela. A solução definitiva foi obtida com a instalação de um segundo filtro sintonizado na 3ª ordem, redimensionado de forma empírica aumentando a potência para 10% da potência da carga (1900 kVAr) e assim reduzindo a distorção individual para 0,56%, abaixo do limite de 0,6%. Conclui-se que a conexão de complexos de *data centers* à Rede Básica é tecnicamente viável, desde que acompanhada de medidas de mitigação harmônica adequadamente dimensionadas, e que o projeto de filtros deve ser conduzido de forma sistêmica, considerando a interação global entre os elementos reativos da instalação e a impedância equivalente da rede.

Palavras-chave: *Data Center*, Qualidade da Energia Elétrica, Rede Básica, Harmônicos, Requisitos de Acesso e ONS.

ABSTRACT

The accelerated expansion of data centers, driven by the rise of Artificial Intelligence and the growing demand for digital services, has significantly increased electrical energy consumption and intensified concerns regarding the impacts of these facilities on Power Quality (PQ). Due to the non-linear nature of their loads, especially uninterruptible power supply (UPS) systems and frequency inverter-based cooling systems, these facilities act as potential sources of harmonic distortions, which can compromise grid performance at the point of connection. Given this scenario, the present work aims to analyze the harmonic distortions generated by data center operations and evaluate mitigation strategies in light of the access requirements for the Bulk Power System (*Rede Básica*). The adopted methodology articulates three levels of analysis: field measurements of a real medium-sized facility located in Uberlândia/MG, according to the PRODIST Module 8 guidelines; computational modeling of linear and non-linear loads in the MATLAB/Simulink environment, based on the measured data; and the access study of a hyperscale complex to the 230 kV Bulk Power System, conducted in the HarmZs software in accordance with ONS Technical Note NT 009/2016 (rev. 03), representing the Internal Network with a Norton equivalent and the External Network using the Geometric Locus of harmonic admittances. Field measurements confirmed an emission profile compatible with 6- and 12-pulse rectifiers, with all PQ indicators within regulatory limits. In the access study, the original configuration showed a violation of the individual limit for the 11th harmonic order at the Point of Common Coupling (PCC). The insertion of a tuned passive filter for this order corrected the initial non-compliance but caused an amplification of the 3rd harmonic order due to a parallel resonance effect. The definitive solution was achieved by installing a second filter tuned to the 3rd order, empirically resized by increasing its power to 10% of the load power (1900 kVAr), which reduced the individual distortion to 0.56%, remaining below the 0.6% limit. It is concluded that the connection of data center complexes to the Bulk Power System is technically viable, provided it is accompanied by properly sized harmonic mitigation measures, and that the filter design must be conducted systemically, considering the global interaction between the facility's reactive elements and the equivalent grid impedance.

Keywords: Data Center; Power Quality; Transmission Network; Harmonics, Access Requirements and ONS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de cargas dos data centers	18
Figura 2 - Diagrama unifilar da <i>UPS</i>	19
Figura 3 - Fluxograma metodológico da pesquisa.....	22
Figura 4 - Esquemático de interligação dos componentes elétricos do sistema de servidores.....	30
Figura 5 - Tipos de trocadores de calores utilizados nos <i>data centers</i>	32
Figura 6 - Diagrama unifilar simplificado do <i>data center</i> , com os dois transformadores e os dois pontos de medição	37
Figura 7 - Analisador de Qualidade de Energia Fluke 435 Série II	39
Figura 8 - Banco de bateria, painel QTM e <i>UPS</i>	40
Figura 9 – Painel QTM.....	40
Figura 10 - Espectro de correntes harmônicas medido no QTM.....	41
Figura 11 - Espectro de distorções harmônicas de tensão medido no QTM	43
Figura 12 - Medição dos níveis de tensão no QTM	44
Figura 13 – Medidor instalado no QTA USINA 500	46
Figura 14 - Medidor instalado no QTA USINA 500.....	46
Figura 15 - Espectro de correntes harmônicas medidas no transformador de 500 kVA	47
Figura 16 - Espectro de distorções harmônicas de tensão medido no transformador de 500 kVA	47
Figura 17 - Medição dos níveis de tensão no transformador de 500 kVA	49
Figura 18 - Diagrama em blocos da modelagem computacional da <i>UPS</i> no ambiente MATLAB/Simulink.	54
Figura 19 - Diagrama em blocos da modelagem computacional do sistema de climatização no ambiente MATLAB/Simulink.....	55
Figura 20 - Diagrama em blocos da modelagem equivalente da rede de distribuição e acoplamento das cargas do <i>data center</i>	57
Figura 21 – Correntes certificadas verificadas no PAC.	58
Figura 22 - Representação do equivalente de Norton da Rede Interna e do Lugar Geométrico da Rede Básica vistos do PAC	61
Figura 23 - Ilustração gráfica do método do LG tipo Polígono de “n” Lados	62
Figura 24 - Intervalo harmônico adotado para a construção do Lugar Geométrico do tipo polígono de n lados, considerando a faixa $h \pm 0,5$	63
Figura 25 - Representação da interligação dos módulos de <i>data centers</i> com a rede básica 230kV	67
Figura 26 - Representação da rede básica e do PAC.....	68

Figura 27 - Relação de distorções harmônicas máximas calculadas por frequência para o cenário base no software HarmZs	70
Figura 28 - Representação da inserção do filtro harmônica de 11 ^a ordem nos barramentos de 13,8kV	72
Figura 29 - Relação de distorções harmônicas máximas calculadas por frequência para o cenário com filtro harmônico de 11 ^a ordem no software HarmZs	74
Figura 30 - Representação da inserção do filtro harmônica de 11 ^a ordem e de 3 ^a ordem nos barramentos de 13,8kV	76
Figura 31 - Relação de distorções harmônicas máximas calculadas por frequência para o cenário com filtro harmônico de 3 ^a e 11 ^a ordem no software HarmZs	77
Figura 32 - Relação de distorções harmônicas máximas calculadas por frequência para o cenário com filtro harmônico de 3 ^a e 11 ^a ordem no software HarmZs	78
Figura 33 - Lugares Geométricos da 2 ^a à 50 ^a ordem	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado da medição na <i>UPS</i>	43
Tabela 2 - Índices de Pst e Plt no QTM.....	45
Tabela 3 - Resultado da medição no transformador de 500 kVA	48
Tabela 4 - Índices de Pst e Plt no transformador de 500 kVA	49
Tabela 5 - Limites individuais e globais de distorção harmônica de tensão aplicáveis às diferentes classes de tensão.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampere
CA	Corrente Alternada
<i>AFE</i>	<i>Active Front End</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>BESS</i>	<i>Battery Energy Storage System</i>
BT	Baixa Tensão
CC	Corrente Contínua
<i>CRAC</i>	<i>Computer Room Air Conditioner</i>
<i>CRAH</i>	<i>Computer Room Air Handler</i>
DHT	Distorção Harmônica Total
DRC	Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica
DRP	Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária
<i>EC</i>	<i>Electronically Commutated</i>
IA	Inteligência Artificial
<i>IGBT</i>	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
<i>HVAC</i>	<i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i>
MT	Média Tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
<i>PDU</i>	<i>Power Distribution Unit</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade da energia elétrica
S	Segundos
TI	Tecnologia da Informação
<i>THD</i>	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
<i>UPS</i>	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
<i>VFD</i>	<i>Variable Frequency Drive</i>

V

Volt

μ

Micro

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Contextualização do tema	16
1.2 Fluxograma metodológico da pesquisa	21
1.3 Objetivos	23
1.4 Contribuições do trabalho	23
1.5 Estrutura da dissertação	24
2 INFRAESTRUTURA ELÉTRICA DE DATA CENTERS: TOPOLOGIA E CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS	27
2.1 Considerações iniciais	27
2.2 Sistema de servidores	27
2.3 Sistema de climatização	31
2.4 Fundamentação e Critérios de Projeto de Filtros Harmônicos Passivos	34
2.4.1 Seleção da Potência Reativa Capacitiva (Q_f)	34
2.4.2 Fator de Qualidade (Q) e Dessintonia (δ)	34
2.4.3 Fenômeno de Ressonância Paralela e Interação Sistêmica	35
3 CAMPANHA DE MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DA QEE EM DATA CENTER	36
3.1 Considerações iniciais	36
3.2 Apresentação do arranjo elétrico do data center	36
3.3 Equipamento de medição utilizado	38
3.4 Medição de QEE realizada na <i>UPS</i>	39
3.4.1 Resultados– Distorções Harmônicas	41
3.4.2 Resultados– Demais Indicadores de QEE	43
3.5 Medição de QEE realizada no alimentador de climatização	45
3.5.1 Resultados – Distorções Harmônicas	46
3.5.1 Resultados – Demais Indicadores de QEE	48
3.6 Considerações gerais a respeito das medições realizadas	50

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES DO DATA CENTER	52
4.1 Considerações iniciais	52
4.2 Modelagem da <i>UPS</i> e de seu carregamento	53
4.3 Modelagem do sistema de climatização	54
4.4 Caracterização das correntes harmônicas certificadas	56
4.5 Integração do modelo computacional	57
5 ESTUDO DE ACESSO E ANÁLISE HARMÔNICA DO COMPLEXO DE DATA CENTERS NO AMBIENTE HARMZS	60
5.1 Considerações iniciais	60
5.2 Fundamentação acerca metodologia estabelecida pela NT 009/2016	61
5.3 Modelagem da Rede Interna do Data Centers e definição do PAC com a Rede Externa	64
5.4 Critérios normativos de avaliação	68
5.5 Resultados da primeira simulação	69
5.6 Projeto do filtro passivo sintonizado para a 11ª ordem para a planta do <i>data center</i>	70
5.7 Resultados da segunda simulação – com filtro de 11ª ordem	73
5.8 Projeto do filtro de 3ª ordem e adequação final	74
5.9 Resultados da terceira simulação – com filtro de 11ª ordem e 3ª ordem	77
5.10 Resultados da quarta simulação – com filtro de 11ª ordem e 3ª ordem com maior potência	77
5.11 Consolidação dos resultados do estudo harmônico	78
6 CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE A	87
APÊNDICE B	88
APÊNDICE C	97

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

Com o início da Quarta Revolução Industrial em 2011, gerou-se um grande aumento no volume de dados digitais que passaram a ser gerados, armazenados e processados globalmente. Aplicações que demandam um fluxo de dados como serviços em nuvem, redes sociais, plataformas financeiras, sistemas corporativos e, de forma mais intensa nos últimos anos, algoritmos de Inteligência Artificial (IA), elevaram substancialmente a necessidade por infraestrutura computacional para o seu desempenho. Tal infraestrutura é materializada nos *data centers*, instalações dedicadas ao processamento, armazenamento e gerenciamento de dados, cuja capacidade pode variar desde pequenos servidores corporativos, tipicamente com potências que variam de valores inferiores a 500 kW até grandes complexos computacionais de muitos megawatts e com milhares de metros quadrados e equipamentos interconectados. Esses empreendimentos de grande porte, conhecidos como *hyperscale*, podem apresentar demandas superiores a 100 MW, sendo, em muitos casos, conectados diretamente à rede básica de energia elétrica.

Estudos recentes indicam que o consumo energético global dos *data centers* já representa entre 1% e 1,5% do consumo total de eletricidade, conforme apontado em “*Data centres & networks*” (2025). Projeções apresentadas por Koot e Wijnhoven (2021) indicam um crescimento exponencial desse consumo, estimando valores da ordem de 752 TWh em 2030, o que corresponderia a aproximadamente 2,13% do consumo energético mundial. Essa pressão sobre o sistema elétrico é agravada pela ascensão da IA, conforme discutido por Lin et al., (2024), os quais projetam que a IA elevará o crescimento anual da demanda para 11,3%, sugerindo que o planejamento energético atual precisa ser reformulado para suportar essa

escala. Sob a ótica da sustentabilidade, Niewenhuis et al. (2024) introduz a ferramenta *FootPrinter*, destacando que o aumento do consumo energético para *Large Language Models* (LLMs) impacta diretamente a pegada de carbono do setor, tornando a eficiência energética e a QEE pilares indissociáveis da operação moderna dos *data centers*.

Uma revisão bibliográfica abrangente conduzida por Kamiya; Coroamă (2025), baseada em mais de 100 artigos, relatórios e estatísticas publicados desde 2013, aponta que algumas projeções estimam um consumo entre 600 e 900 TWh/ano em 2030. Entretanto, os autores argumentam que, devido a limitações econômicas, tecnológicas e operacionais, o consumo real provavelmente se situará entre 200 e 400 TWh/ano. Ressalta-se ainda que, embora atualmente as aplicações de IA representem uma parcela relativamente modesta do consumo total, da ordem de algumas dezenas de TWh por ano, as projeções para o período entre 2028 e 2030 apresentam grande variabilidade, refletindo a incerteza associada à rápida expansão dos *data centers* dedicados à IA. De forma complementar, Sunkara e Narukulla (2025) destacam que a implantação de 87 *data centers hyperscale* voltados à IA pode resultar em um consumo de eletricidade equivalente ao de toda a cidade de Nova York, além de apontarem que um *rack* dedicado a aplicações de IA pode consumir aproximadamente sete vezes mais energia do que um *rack* convencional.

Esse crescimento mais acelerado dos *data centers* voltados à IA, em comparação aos convencionais, é evidenciado por Lin et al. (2024), em um estudo conduzido pela operadora estatal de transmissão de energia da Irlanda, a EirGrid, em uma região caracterizada como *hotspot* de *data centers*. Os resultados indicaram uma taxa de crescimento anual composta de 10,6% para *data centers* convencionais, enquanto a incorporação de cargas associadas à IA elevou essa taxa para 16,7%.

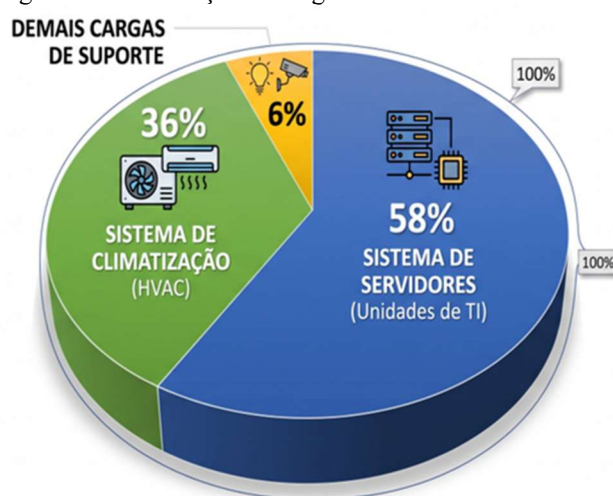
O crescimento acelerado desse tipo de instalação tem despertado crescente atenção de operadores, planejadores e órgãos reguladores do setor elétrico, sobretudo em razão do elevado consumo energético e dos potenciais impactos associados à QEE, contexto no qual, de acordo com Dugan et al. (2002), a QEE refere-se a qualquer desvio nas formas de onda de tensão, corrente ou frequência capaz de ocasionar mau funcionamento, degradação de desempenho ou falhas em equipamentos elétricos. Nesse contexto, a expansão dos *data centers*, especialmente aqueles voltados ao processamento de IA, tem intensificado a preocupação de ocorrência de distorções harmônicas de tensão no ponto de conexão.

Apesar de a QEE ser um tema amplamente documentado na literatura científica, os fenômenos decorrentes da operação de *data centers* de grande porte na rede de transmissão de alta tensão representam uma fronteira de estudo ainda em desenvolvimento. No que diz respeito

ao impacto dessas cargas na rede elétrica e sua respectiva normatização, o trabalho de Nassif, Wang e Rahimi Pordanjani (2018) analisa *data centers* de 20 MW e 32 MW dedicados à mineração de criptomoedas. Embora tais instalações possuam perfis de carga e redundâncias distintos dos centros de processamento de dados tradicionais, as conclusões obtidas no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) são fundamentais: a conformidade de dispositivos individuais não garante a conformidade da carga agregada. Complementarmente, Zubi e Khalifa, (2016) demonstram, através de um estudo em um *data center* de telecomunicações, que o impacto harmônico é expressivo mesmo em cenários de subcarga (38% da capacidade nominal), excedendo limites da norma internacional *IEEE 519* (2022). Tal evidência reforça a necessidade de uma modelagem detalhada, visto que os *data centers* geralmente não operam em carga plena de forma constante (Wang et al., 2013).

Para entender melhor a origem das distorções harmônicas, cabe analisar de forma mais detalhada a composição das cargas elétricas desses empreendimentos. Assim, observa-se que o consumo energético está majoritariamente concentrado em dois segmentos: a infraestrutura de Tecnologia da Informação (TI) e os sistemas de climatização (*Heating, Ventilation and Air Conditioning – HVAC*). De acordo com Ahmed, Alvarez e Bollen (2021), as unidades de processamento e servidores respondem por cerca de 58% do consumo total, enquanto os sistemas de climatização correspondem a aproximadamente 36%. Os outros 6% restantes distribuem-se entre iluminação, sistemas auxiliares, equipamentos de segurança e demais cargas de suporte, conforme ilustrado na Figura 1. Ahmed et al., (2019) fornece o embasamento para a modelagem energética por componentes, essencial para as etapas de simulação.

Figura 1 - Distribuição de cargas dos data centers

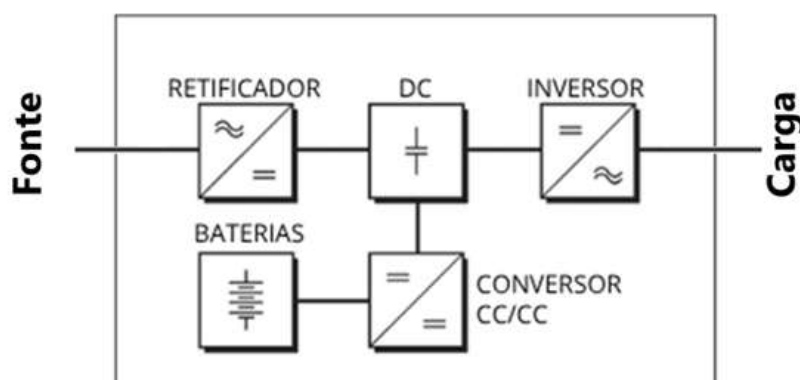


Fonte: Ahmed, Alvarez e Bollen (2021)

A corrente elétrica que alimenta as unidades de processamento e servidores deve ser devidamente condicionada, de modo a garantir a continuidade do fornecimento mesmo diante de interrupções ou variações na rede elétrica. Essa função é desempenhada pelos sistemas de alimentação ininterrupta (*UPS – Uninterruptible Power Supply*), popularmente conhecidos como *nobreaks*. Esses equipamentos possuem duas funções principais: assegurar a continuidade do suprimento de energia e melhorar a qualidade da energia fornecida às cargas sensíveis.

De forma geral, conforme apresentado pela Figura 2, o princípio de operação das *UPS* baseia-se na conversão de energia elétrica por meio de múltiplos estágios de conversão. Inicialmente, o fluxo em corrente alternada (CA) proveniente da concessionária é convertida em corrente contínua (CC) por meio de um retificador de onda. Em seguida, essa energia é direcionada a um barramento CC, ao qual está conectado um banco de baterias responsável por suprir a demanda da carga em caso de falta. Por fim, um inversor reconverte a tensão contínua em alternada, fornecendo uma tensão estabilizada adequada às necessidades da infraestrutura de TI.

Figura 2 - Diagrama unifilar da *UPS*



Fonte: Autoria própria.

Esse processo de conversão é detalhado por Aamir, Ahmed Kalwar e Mekhilef (2016), que também apresentam as diferentes topologias de *UPS*. Independentemente da configuração adotada, observa-se que o primeiro estágio de interação com a rede elétrica ocorre no retificador e, em razão de sua natureza não linear, esse componente é o principal responsável pela introdução de distorções harmônicas de corrente, podendo resultar em distorções harmônicas de tensão que violam os limites regulatórios no ponto de conexão.

O outro item crucial na operação de um *data center* é o sistema de climatização, conforme comentado anteriormente, corresponde a aproximadamente 36% da demanda

energética total da instalação. Assim como as *UPS*, os sistemas de climatização possuem diferentes topologias de troca de calor, as quais impactam diretamente a eficiência energética, a confiabilidade operacional do *data center*. De acordo com Alkrush et al., (2024), essas topologias podem ser classificadas, de forma geral, em:

- Sistemas de Expansão Direta (*DX – Direct Expansion*), nos quais a remoção de calor ocorre por meio da compressão mecânica de vapor, utilizando fluido refrigerante em circuito fechado, com troca térmica direta com o ar do ambiente;
- Sistemas de Água Gelada (*Chilled Water*), em que uma central de água gelada, composta por *chillers* instalados externamente ao *data center*, fornece água fria para serpentinas localizadas nas unidades de tratamento de ar, realizando a troca térmica de forma indireta;
- Sistemas de Resfriamento Líquido (*Liquid Cooling*), nos quais o calor é removido diretamente dos componentes eletrônicos por meio de placas frias ou outros dispositivos em contato direto com os processadores, sendo indicados principalmente para ambientes de alta densidade de potência.

Independentemente da topologia de troca térmica adotada, seja por Expansão Direta (*DX*), Água Gelada (*Chilled Water*) ou Resfriamento Líquido (*Liquid Cooling*), a busca por maior eficiência energética e controle preciso de temperatura tem impulsionado a adoção de eletrônica de potência nesses sistemas. Atualmente, o controle de capacidade e vazão é realizado predominantemente por meio de inversores de frequência acoplados aos motores de compressores, bombas de circulação, ventiladores e *Computer Room Air Handler (CRAH)* (Capozzoli; Primiceri, 2015) .

Conforme discutido por Aamir; Ahmed Kalwar; Mekhilef, (2016) no contexto das *UPS*, esses dispositivos de controle também operam baseados em estágios de retificação e inversão. Consequentemente, tais sistemas de climatização passam a se comportar como cargas de natureza não linear, tornando-se, juntamente com a infraestrutura de TI, os principais responsáveis pela introdução de distorções harmônicas de corrente no ponto de conexão.

Para avaliar a integração desse bloco de cargas com a rede de transmissão de alta tensão, o trabalho de Teixeira (2009) serve como referência metodológica ao apresentar um estudo de caso em um sistema industrial conectado à rede básica. A aplicação de limites e a simulação de melhorias no fator de potência e nas distorções harmônicas fornecem o roteiro técnico para a avaliação de conformidade realizada nesta pesquisa. Por fim, a escolha e o dimensionamento

das soluções de filtragem passiva para mitigação baseiam-se na classificação de eficiência e aplicabilidade proposta por Hussein A. Kazem (2013).

Diante desse cenário, a análise das distorções harmônicas geradas pelos *data centers* torna-se necessária para se quantificar o impacto gerado na QEE da rede básica sob a ótica dos requisitos de acesso do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e do PRODIST (Módulo 8), de modo a subsidiar ações de planejamento, operação e mitigação, contribuindo para a confiabilidade e a eficiência do sistema elétrico de potência.

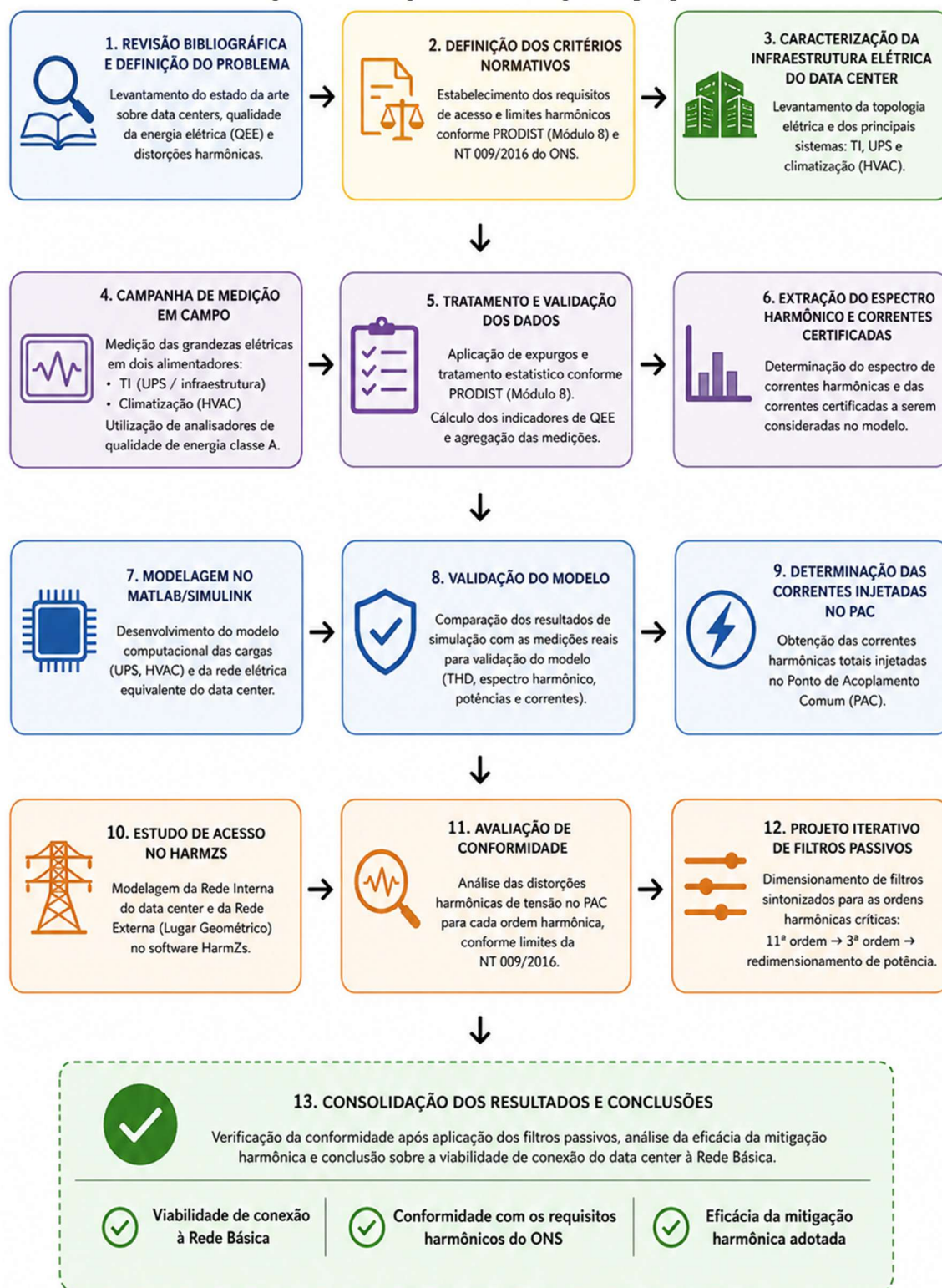
1.2 Fluxograma metodológico da pesquisa

A metodologia adotada nesta dissertação foi estruturada de forma sequencial, contemplando etapas de medição em campo, modelagem computacional e análise de acesso à Rede Básica. Inicialmente, foram realizadas medições de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) em um data center em operação, visando caracterizar o comportamento elétrico e o espectro de correntes harmônicas das principais cargas não lineares da instalação. Em seguida, os dados obtidos serviram de base para a modelagem computacional dos sistemas de alimentação ininterrupta (UPS) e de climatização no ambiente MATLAB/Simulink, permitindo a obtenção das correntes harmônicas certificadas utilizadas nos estudos subsequentes.

Posteriormente, foi desenvolvido um modelo representativo de um complexo de data centers de grande porte conectado à Rede Básica em 230 kV. Com base nas diretrizes estabelecidas pela Nota Técnica ONS NT 009/2016 (rev. 03), foram realizados estudos harmônicos no software HarmZs, utilizando a representação da Rede Interna por equivalente de Norton e da Rede Externa por Lugar Geométrico das admitâncias harmônicas. Por fim, foram avaliadas alternativas de mitigação por meio da inserção de filtros passivos sintonizados, verificando-se a conformidade dos indicadores de distorção harmônica com os limites normativos aplicáveis.

A Figura 3 apresenta o fluxograma resumido das etapas metodológicas desenvolvidas nesta pesquisa.

Figura 3 - Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Autoria própria.

1.3 Objetivos

Em consonância com as considerações pautadas, esta dissertação de mestrado tem como objetivo geral avaliar os impactos das distorções harmônicas geradas pela operação de *data centers* conectados à rede básica de energia elétrica, bem como analisar possíveis estratégias de mitigação das inconformidades observadas, à luz dos critérios de Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

Para se atingir o objetivo central, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- **Obtenção de dados de medição em uma estrutura real de *data center*:** Visando à caracterização das grandezas elétricas e do perfil de emissão harmônica das cargas de natureza não linear associadas à infraestrutura de Tecnologia da Informação (TI) e aos sistemas de climatização, servindo de subsídio e validação para as etapas de modelagem;
- **Estruturação de um modelo computacional representativo:** Que retrate fielmente o comportamento elétrico e o regime harmônico agregado do empreendimento, permitindo determinar o espectro de correntes injetadas no ponto de entrega para suporte a estudos correlatos de qualidade da energia;
- **Realização de estudo de caso fundamentado nos requisitos de acesso do ONS:** Contemplando o impacto da integração de uma carga especial de *data center* de grande porte na Rede Básica, com a avaliação das distorções de tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) e o dimensionamento de estruturas de filtragem passiva para a garantia da conformidade regulatória global.

1.4 Contribuições do trabalho

Em consonância com as considerações pautadas, esta dissertação pretende contribuir com subsídios técnicos ao planejamento e à operação do sistema elétrico, especialmente no contexto do crescimento acelerado de *data centers* conectados às redes de média e alta tensão. As contribuições desta dissertação podem ser sintetizadas da seguinte forma:

- Contribuição à comunidade acadêmica, por meio da apresentação de medições reais de Qualidade da Energia Elétrica em um *data center* em operação,

contemplando a caracterização do espectro de distorções harmônicas de corrente em dois alimentadores distintos: um dedicado à infraestrutura de Tecnologia da Informação (TI) e outro aos sistemas de climatização;

- Caracterização da corrente harmônica demandada na rede de média tensão, a partir de dados medidos e modelados, permitindo a representação realista do comportamento não linear das cargas típicas de *data centers*;
- Avaliação do impacto das correntes harmônicas na distorção harmônica de tensão na rede de alta tensão, considerando a propagação dos efeitos a partir do Ponto de Acoplamento Comum até a rede básica, com base em modelos equivalentes da rede externa;
- Demonstração das características elétricas de um *data center* sob a ótica de carga não linear, analisando de forma integrada os principais subsistemas consumidores de energia (TI e climatização) e sua contribuição relativa para a degradação da qualidade da energia;
- Apoio técnico a operadores, planejadores e empreendedores, ao fornecer uma metodologia aplicável para análise de impactos harmônicos de *data centers* de grande porte, bem como subsídios para a definição de estratégias de mitigação, como a aplicação de filtros harmônicos passivos.

Dessa forma, este trabalho está voltado para preencher uma lacuna técnica relevante na literatura e na prática do setor elétrico, ao tratar de maneira integrada medições em campo, modelagem harmônica e avaliação de impactos na rede básica, em um cenário marcado pela rápida expansão do setor de *data centers* e pela crescente presença de cargas intensivas embasadas em eletrônica de potência.

1.5 Estrutura da dissertação

Este trabalho dissertativo encontra-se dividido em seis capítulos. Além do presente capítulo introdutório, tem-se os seguintes capítulos estruturantes:

Capítulo 2 – Infraestrutura Elétrica de *Data Centers*: Topologia e Caracterização das Cargas

Concentra-se no detalhamento dos subsistemas físicos e elétricos que dão suporte operacional a um centro de processamento de dados. Esta seção elucida as configurações de redundância empregadas, o funcionamento das unidades de Tecnologia da Informação (TI), os sistemas de alimentação ininterrupta (*UPS*) e os arranjos de climatização industrial (*HVAC*), mapeando o comportamento eletroeletrônico que fundamenta a geração de distorções harmônicas nessas instalações.

Capítulo 3 – Campanha de Medição e Avaliação da QEE em *Data Center*

Reúne os procedimentos práticos e os critérios metodológicos adotados na coleta de dados de QEE em uma planta de médio porte real localizada em Uberlândia/MG. São especificados os instrumentos de medição de Classe A utilizados, o tratamento estatístico e os expurgos realizados com base no PRODIST (Módulo 8), além de apresentar os espectros harmônicos consolidados de forma individualizada para os circuitos de processamento e refrigeração.

Capítulo 4 – Modelagem Computacional das Cargas Lineares e Não Lineares do *Data Center*

Dedica-se ao desenvolvimento do modelo computacional das cargas lineares e não lineares existentes em um típico *data center*. Para tanto, tem-se o emprego do software de simulação de sistemas elétricos MATLAB/Simulink. O capítulo aborda a parametrização de pontes retificadoras e inversores de frequência a partir das curvas de campo obtidas, realizando um processo de calibração iterativo focado na exatidão do espectro de correntes agregadas remetidas ao barramento de média tensão.

Capítulo 5 – Estudo de Acesso e Análise Harmônica no Ambiente HarmZs

Consolida a avaliação sistêmica sobre os impactos decorrentes da conexão de um *data center* de grande porte (*hyperscale*) à Rede Básica de alta tensão. A metodologia abrange a modelagem dinâmica da rede externa ao empreendimento por meio de polígonos de admitâncias e a simulação do fluxo de potência harmônico no software *HarmZs*. A partir dos cenários críticos avaliados, confrontam-se os índices de distorção de tensão com os limites do

Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede do ONS e projeta-se, de modo simplificado, um arranjo de filtros passivos RLC para mitigação de distorções harmônicas.

Capítulo 6 – Conclusões

Expõe as considerações finais advindas dos desenvolvimentos feitos ao longo da pesquisa, ponderando-se acerca do cumprimento das metas propostas e sintetizando as principais contribuições oferecidas ao setor elétrico.

CAPÍTULO II

2 INFRAESTRUTURA ELÉTRICA DE DATA CENTERS: TOPOLOGIA E CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS

2.1 Considerações iniciais

Para compreender as características elétricas de um *data center* e o impacto gerado na QEE pelo mesmo no PAC, que é a fronteira física que delimita as responsabilidades entre a rede da concessionária e a instalação privada, é relevante entender a quais equipamentos elétricos compõem a instalação e suas respectivas topologias de interligação.

Nesse cenário, este capítulo descreve a composição e a arquitetura dos equipamentos elétricos de um *data center*, com ênfase nos dispositivos que atuam como potenciais fontes de distorção harmônica. Destacando dois grandes sistemas de consumo de energia elétrica: o de servidores (unidades de TI), que responde por cerca de 58% do consumo total, e o sistema de climatização, correspondente a aproximadamente 36%, já o restante das cargas distribui-se entre iluminação, sistemas auxiliares, equipamentos de segurança e demais cargas de suporte (Ahmed, Alvarez e Bollen 2021). Diante do exposto, segue abaixo um melhor detalhamento destes dois sistemas.

2.2 Sistema de servidores

O sistema de servidores de um *data center* possui diversos componentes, sendo o módulo de servidor o elemento fundamental. Esse equipamento é similar a um gabinete de computador, porém construído de forma compacta em formato de módulo, com altura geralmente medida em "U" (*Rack Unit*). Uma unidade (1U) equivale a 1,75 polegada (44,45 mm); logo, um módulo de 2U possui 3,5 polegadas. Cada módulo é composto por placa-mãe, processadores, memórias RAM e dispositivos de armazenamento, podendo apresentar variações em sua arquitetura conforme a finalidade operacional: unidades voltadas ao

processamento intensivo e armazenamento de dados (*storage*) ou módulos destinados à conectividade e gerenciamento de tráfego de rede, conhecidos como *switches*.

Geralmente, esses módulos possuem fontes de alimentação redundantes para maior confiabilidade. Estas fontes, por sua vez, realizam a conversão de corrente alternada (CA), tipicamente 220 V, para corrente contínua (CC) em 12 V para suprir a alimentação dos componentes internos. Esse processo utiliza transformadores e retificadores chaveados, tornando o servidor o dispositivo do *data center* que potencialmente pode gerar distorções harmônicas. Entretanto, devido à presença dos sistemas de *UPS* (comentado posteriormente) entre esses equipamentos e a rede da concessionária, as distorções eventualmente geradas individualmente pelos servidores são isoladas e não são injetadas diretamente na rede da concessionária.

Estes módulos de processamento são instalados em racks que são estruturas metálicas que possuem compartimentos para suportação dos módulos que possibilita a sua instalação e extração, geralmente comportam entre 42U a 48U e possui entre 1,7 a 2,0 metros de altura, comportando em torno de 21 módulos de servidores em cada rack. Para a alimentação desses módulos, utiliza-se um equipamento chamado *PDU* (*Power Distribution Units*), que variam de régulas de tomadas inteligentes a painéis de distribuição complexos, permitindo a distribuição de cabos de alimentação para os módulos, além de realizar o monitoramento de carga e temperatura em tempo real.

A distribuição física dos racks no ambiente é projetada de forma estratégica para otimizar o espaço e a eficiência do complexo. Essas estruturas são dispostas em fileiras, formando corredores (frequentemente configurados como "corredor quente" e "corredor frio" para otimização térmica). Uma única sala de máquinas (*Data Hall*) pode abrigar desde dezenas até centenas de racks. Considerando que cada rack de 42U pode comportar até 21 módulos de 2U, uma instalação de médio porte com 100 racks pode operar simultaneamente mais de 2.000 servidores, o que evidencia a magnitude da carga agregada em um *data center*. Fica claro, portanto, que a densidade de potência e processamento do empreendimento está diretamente relacionada ao arranjo espacial de suas estruturas no ambiente físico.

Para gerenciar a entrega de energia a essa densa rede de servidores, utilizam-se, conforme já afirmado, as *PDU*. A arquitetura de ligação desses equipamentos é estratégica para garantir a redundância na instalação, sendo utilizado dois tipos de *PDU*, a saber:

- ***PDU de Gabinete (Floor PDU)***: São unidades de grande porte, semelhantes a painéis elétricos, que recebem a energia da *UPS* e a distribuem para as fileiras de racks.

- **PDU de Rack (*rPDU*):** São régua de distribuição instaladas verticalmente ou horizontalmente dentro de cada rack. Elas recebem a alimentação das *PDU* de gabinete e entregam as tomadas finais para as fontes dos servidores.

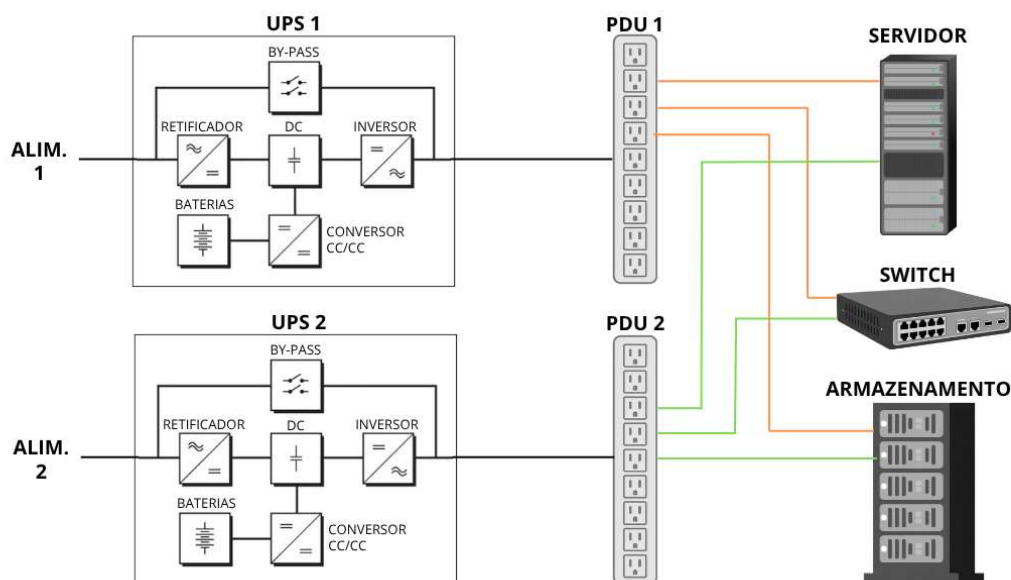
A arquitetura de ligação segue, na maioria das vezes, a configuração chamada de 2N. Isso significa que cada rack recebe alimentação de duas *PDU* distintas (provenientes de sistemas *UPS* independentes), e cada servidor possui fontes redundantes conectadas simultaneamente a ambas. Do ponto de vista de QEE, as *PDU* modernas não são apenas passivas, elas incorporam eletrônica de potência para monitoramento em tempo real de corrente, tensão, fator de potência e harmônicos por tomada, permitindo monitorar, gerenciar e controlar o consumo de energia de vários dispositivos em ambientes de *data center*.

Estes equipamentos demandam uma quantidade expressiva de energia, a qual deve ser livre de variações de tensão de curta duração, apresentar baixos índices de distorções harmônicas e, fundamentalmente, ser ininterrupta. Tudo isso devido ao fato de os *data centers* serem cargas críticas para o funcionamento de diversas instituições como bancos, hospitais, universidades, empresas e afins.

A Figura 4 ilustra o sistema de suprimento de um servidor por meio de um diagrama unifilar da arquitetura de distribuição de energia para a infraestrutura de TI, baseada em um sistema de redundância do tipo 2N. O esquema detalha o caminho da energia desde os alimentadores de entrada (ALIM. 1 e ALIM. 2) até as cargas críticas. Cada caminho de alimentação é composto por um sistema *UPS* independente (*UPS* 1 e *UPS* 2) de dupla conversão, compostos internamente por retificador, barramento CC com baterias e inversor, cujas saídas alimentam unidades de distribuição de energia (*PDU*) e, posteriormente, as cargas específicas.

A arquitetura evidencia o conceito de fontes redundantes nas cargas finais: o servidor, o switch e o armazenamento (*storage*) recebem simultaneamente a alimentação de ambas as *PDU*, o alimentador 1 indicado pelas conexões em laranja e o alimentador 2 pelas conexões em verde, garantindo a continuidade operacional diante da falha completa de um dos alimentadores.

Figura 4 - Esquemático de interligação dos componentes elétricos do sistema de servidores



Fonte: Autoria própria.

Devido à criticidade das cargas, os *data centers* exigem um fornecimento de energia contínuo e livre de variações de tensão. Para atender a esse requisito, utilizam-se os sistemas *UPS* (*Uninterruptible Power Supply*). Por operar com chaveamento eletrônico constante e estar conectado diretamente à rede elétrica, o *UPS* é um potencial gerador de correntes harmônicas na rede interna do *data center*, já as ordens harmônicas geradas dependem da topologia do retificador e do número de pulsos de chaveamento.

Retificadores de 6 pulsos podem produzir harmônicos característicos de ordem $h = 6k \pm 1$ (sendo k um número inteiro positivo), ao passo que retificadores de 12 pulsos são potenciais produtores de harmônicos de ordem $h = 12k \pm 1$. Na maioria das instalações de grande porte empregam-se *UPS* com retificadores de 12 pulsos ou retificadores ativos do tipo *Active Front End (AFE)*, os quais utilizam dispositivos semicondutores *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) com modulação por largura de pulso (*PWM*). Essa topologia ativa reduz o *ripple* de corrente e a distorção harmônica total (DHT) em comparação às topologias passivas mais antigas (Fang et al., 2016).

Já a topologia interna, ilustrada com maior nível de detalhe na Figura 4. O *UPS* de dupla conversão (online) é assim denominado porque a energia, no modo normal de operação, é sempre convertida duas vezes de CA para CC e novamente de CC para CA, isolando a carga das perturbações da rede de entrada. Sua estrutura compreende os seguintes estágios:

- Retificador (conversor CA/CC): converte a tensão alternada de entrada em tensão contínua, alimentando o barramento CC. É o estágio em que se concentra a geração de harmônicos de corrente, cuja ordem depende do número de pulsos (6 ou 12) ou da adoção da topologia ativa (*AFE*).
- Barramento CC (*DC link*): estágio intermediário em corrente contínua, no qual se conecta, em geral, um banco de capacitores responsável por filtrar a ondulação de tensão e manter a estabilidade do barramento que alimenta o inversor.
- Banco de baterias com conversor bidirecional CC/CC: o banco de baterias armazena energia para o suprimento da carga durante interrupções. Sua conexão ao barramento CC é feita por meio de um conversor bidirecional CC/CC, que atua como controlador de carga. Em operação normal, esse conversor controla o carregamento das baterias a partir do barramento CC; em caso de falta de energia na entrada, ele inverte o fluxo, transferindo a energia armazenada para o barramento CC e mantendo o inversor em funcionamento sem qualquer interrupção perceptível pela carga.
- Inversor (conversor CC/CA): reconverte a energia do barramento CC em corrente alternada regulada, entregando à carga de TI uma senoide estável em amplitude e frequência, independentemente das variações da rede de entrada.
- *By-pass*: o *UPS* dispõe ainda de um caminho de *by-pass*, que conecta diretamente a tensão de entrada em CA à saída, contornando os estágios de conversão. Sua função é assegurar a continuidade do fornecimento em situações excepcionais, sobrecarga, sobretensão, falha do inversor ou manutenção. Em *data centers*, embora o *by-pass* esteja presente por questões de confiabilidade, ele não é utilizado como modo normal de operação: a carga permanece, por padrão, sob a dupla conversão, justamente para preservar o isolamento das perturbações da rede.

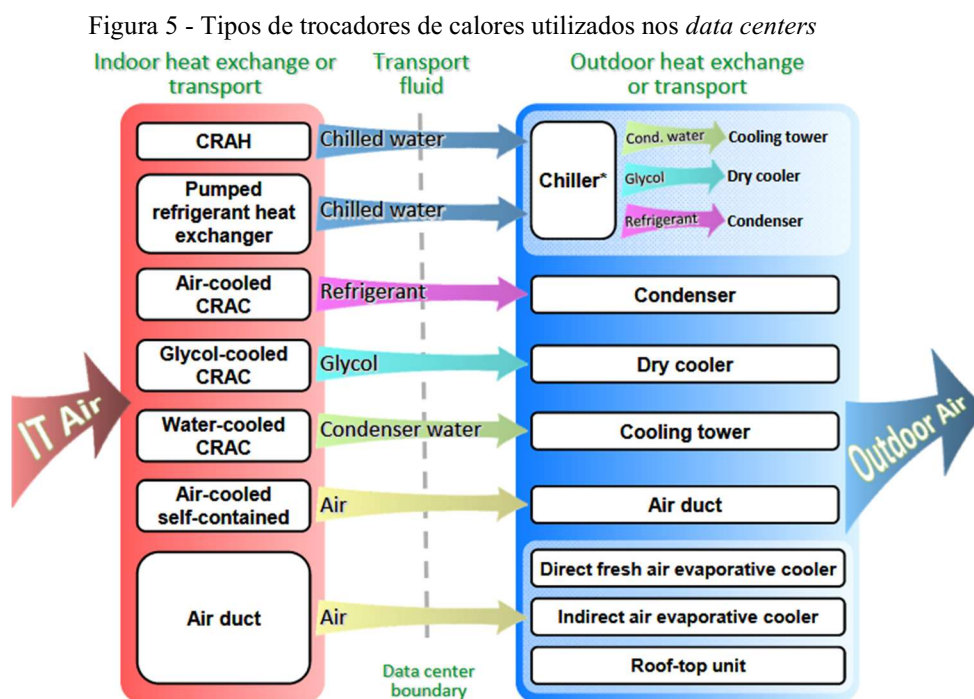
2.3 Sistema de climatização

O sistema de climatização de um *data center* é responsável por manter as condições térmicas e de umidade do local onde ficam os sistemas eletrônicos de TI (*Data Hall*) dentro de

faixas adequadas à operação segura e eficiente. O controle inadequado desses parâmetros pode resultar em degradação de desempenho, redução da vida útil dos equipamentos e até desligamentos não programados por sobreaquecimento.

Para se realizar tal função, primeiramente é necessário realizar a remoção da energia térmica do *Data Hall*, utilizando trocadores de calor transferindo a energia térmica (calor) do ambiente interno para um fluido transportador. Posteriormente, esse fluido é retirado do ambiente interno e transportado para o ambiente externo onde, por fim, é realizada a transferência térmica do fluido para o ar externo através de outro trocador de calor.

Os principais tipos de fluidos e trocadores de calor utilizados, são apresentados na Figura 5, retirada do artigo do Evans (2014) que, inclusive, apresenta de forma detalhada as vantagens de cada tipo de sistema de troca de energia térmica.



Fonte: (Evans, 2014)

Considerando que o foco deste trabalho é a análise das distorções harmônicas geradas pelos *data centers*, torna-se essencial examinar os componentes elétricos utilizados nos sistemas de climatização. Atualmente, alinhada à busca por maior eficiência energética e controle preciso de temperatura tem impulsionado, de forma significativa, a substituição de acionamentos diretos por sistemas eletrônicos de velocidade variável, baseados em eletrônica de potência (Alves et al., 2025). Como consequência, esses sistemas passaram a se comportar como cargas de natureza não linear.

As três cargas principais que atuam como fontes de distorções harmônicas neste sistema estão presentes nas unidades de *CRAH* (*Computer Room Air Handler*), *CRAC* (*Computer Room Air Conditioner*) e os *Chillers*, sendo:

- Compressores com Inversores de Frequência (*VFD*): Em sistemas de expansão direta (*DX*), o compressor é o maior consumidor de energia. Para ajustar a capacidade de refrigeração à carga térmica variável do Data Hall, utilizam-se inversores de frequência. Estes dispositivos possuem retificadores de 6 pulsos (ponte de diodos ou tiristores), que são cargas não lineares, injetando correntes harmônicas de ordens características (5^a, 7^a, 11^a, 13^a) na rede de distribuição interna do *data center* (Raleigh, 2008).
- Motores de Ventiladores (*Fans*): As unidades internas e as torres de resfriamento utilizam ventiladores para a movimentação do ar e troca térmica. Atualmente, é comum o uso de motores *EC* (*Electronically Commutated*) ou motores de indução controlados por pequenos inversores individuais (Portal Engenharia e Arquitetura, 2021). Embora menores que os compressores, a alta densidade dessas unidades em grandes salas de servidores pode gerar um efeito cumulativo de distorção harmônica de corrente (*THDi*) significativo no barramento de baixa tensão.
- Bombas de Circulação de Fluido: Nos sistemas que utilizam água gelada (*Chilled Water*) ou glicol, as bombas responsáveis pelo transporte do fluido entre os ambientes interno e externo também são equipadas com conversores de frequência para controle de vazão. O acionamento eletrônico desses motores contribui para o aumento da poluição harmônica, especialmente se não houver filtros de linha ou indutores de barramento CC integrados.

Ressalta-se que a pesquisa desenvolvida nesta dissertação foi conduzida a partir de medições realizadas em um *data center* em operação que utiliza sistema de climatização por expansão direta com compressores e condensadores do tipo *inverter*.

Dessa forma, observa-se que, assim como a infraestrutura de TI, os sistemas de climatização dos *data centers* constituem fontes relevantes de distorções harmônicas de corrente. A elevada potência instalada, associada ao uso intensivo de inversores de frequência e conversores eletrônicos, faz com que esses sistemas tenham contribuição significativa para a degradação da QEE no ponto de conexão, justificando sua inserção, de forma detalhada, nos modelos desenvolvidos e nas simulações feitas neste trabalho.

2.4 Fundamentação e Critérios de Projeto de Filtros Harmônicos Passivos

A mitigação de distorções harmônicas em instalações industriais e data centers é frequentemente realizada por meio da aplicação de filtros passivos sintonizados conectados em derivação (*shunt*) nos barramentos de distribuição. Esses dispositivos consistem em arranjos RLC série projetados para apresentar baixa impedância na frequência da ordem harmônica que se deseja atenuar, provendo um caminho de menor oposição para o desvio das correntes harmônicas antes que estas alcancem a rede elétrica externa, para tal, o método adotado neste trabalho foi baseado no livro de (Watson, 2003).

2.4.1 Seleção da Potência Reativa Capacitiva (Q_f)

A definição da potência reativa na frequência fundamental (60Hz) fornecida pelo banco capacitivo do filtro deve equilibrar a capacidade de atenuação harmônica com o impacto no fator de potência e no perfil de tensão da instalação:

- **Estimativa em Função da Carga:** Em etapas preliminares de projeto ou em cenários de escassez de dados detalhados sobre a demanda de compensação reativa da planta, adota-se na prática uma alocação inicial de potência capacitiva situada entre 5% e 15% da potência ativa nominal da carga.
- **Limitação por Nível de Curto-Circuito e Sobre-tensão:** A inserção de elementos capacitivos eleva a tensão em regime permanente no barramento de conexão. Para evitar sobre-tensões na frequência fundamental, a potência reativa capacitiva total dos filtros deve ser limitada a um percentual reduzido da potência de curto-circuito (S_{cc}) do ponto de acoplamento, tipicamente entre 1% e 5% de S_{cc} , garantindo que a elevação de tensão não ultrapasse o teto normativo recomendável de 5%.

2.4.2 Fator de Qualidade (Q) e Dessintonia (δ)

Além da potência reativa capacitiva, o desempenho de um filtro passivo sintonizado depende da escolha do fator de qualidade (Q) e do fator de dessintonia (δ). Esses parâmetros

influenciam diretamente a seletividade do filtro, sua eficiência na atenuação das correntes harmônicas e sua sensibilidade às variações dos componentes e das condições de operação do sistema elétrico.

- **Fator de Qualidade (Q):** O fator de qualidade está associado às perdas internas do circuito RLC e determina a largura da faixa de atuação do filtro. Valores elevados de Q tornam o filtro mais seletivo e eficiente na frequência de sintonia, porém aumentam sua sensibilidade às variações da rede. Em contrapartida, valores menores proporcionam maior robustez operacional, porém com menor capacidade de filtragem. Em aplicações industriais, são normalmente adotados valores entre 30 e 100.
- **Fator de Dessintonia (δ):** O fator de dessintonia representa o desvio entre a frequência de sintonia do filtro e a frequência harmônica de interesse. Na prática, costuma-se projetar o filtro ligeiramente abaixo da ordem harmônica desejada, reduzindo os efeitos das tolerâncias construtivas e minimizando o risco de ocorrência de ressonâncias com a rede elétrica.

2.4.3 Fenômeno de Ressonância Paralela e Interação Sistêmica

A instalação de filtros passivos modifica a impedância equivalente do sistema elétrico e pode alterar a resposta em frequência da instalação. Caso o filtro seja inadequadamente dimensionado, podem ocorrer fenômenos de ressonância paralela entre os elementos capacitivos do filtro e a indutância equivalente da rede, resultando na amplificação de determinadas componentes harmônicas em vez de sua mitigação.

Por essa razão, o projeto de filtros harmônicos deve considerar não apenas a ordem harmônica que se deseja reduzir, mas também a interação entre o filtro, a potência de curto-circuito do sistema e a impedância equivalente da rede. Dessa forma, recomenda-se que o dimensionamento seja sempre validado por meio de estudos computacionais que permitam avaliar o comportamento harmônico global da instalação antes da implementação da solução.

CAPÍTULO III

3 CAMPANHA DE MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DA QEE EM DATA CENTER

3.1 Considerações iniciais

Na etapa prática do trabalho, o primeiro passo consistiu na coleta de dados por meio de medições em um *data center* real, localizado na cidade de Uberlândia/MG. Essas medições forneceram a base prática necessária para o dimensionamento dos componentes durante a simulação. Além disso, os levantamentos de campo permitiram obter informações complementares, tais como a arquitetura de ligação do sistema elétrico, a distribuição física da instalação e os modelos das *UPS* e dos sistemas de ar-condicionado.

Este capítulo está dedica-se a explicar desde o panorama geral da instalação aos resultados detalhados das medições. Inicialmente, descreve-se o arranjo elétrico do *data center* e seu diagrama unifilar, com a indicação dos pontos de medição. Na sequência, caracteriza-se o equipamento utilizado e apresentam-se os resultados obtidos nos dois principais alimentadores da instalação, o da infraestrutura de TI e o do sistema de climatização, encerrando-se com as considerações gerais a respeito da campanha de medição.

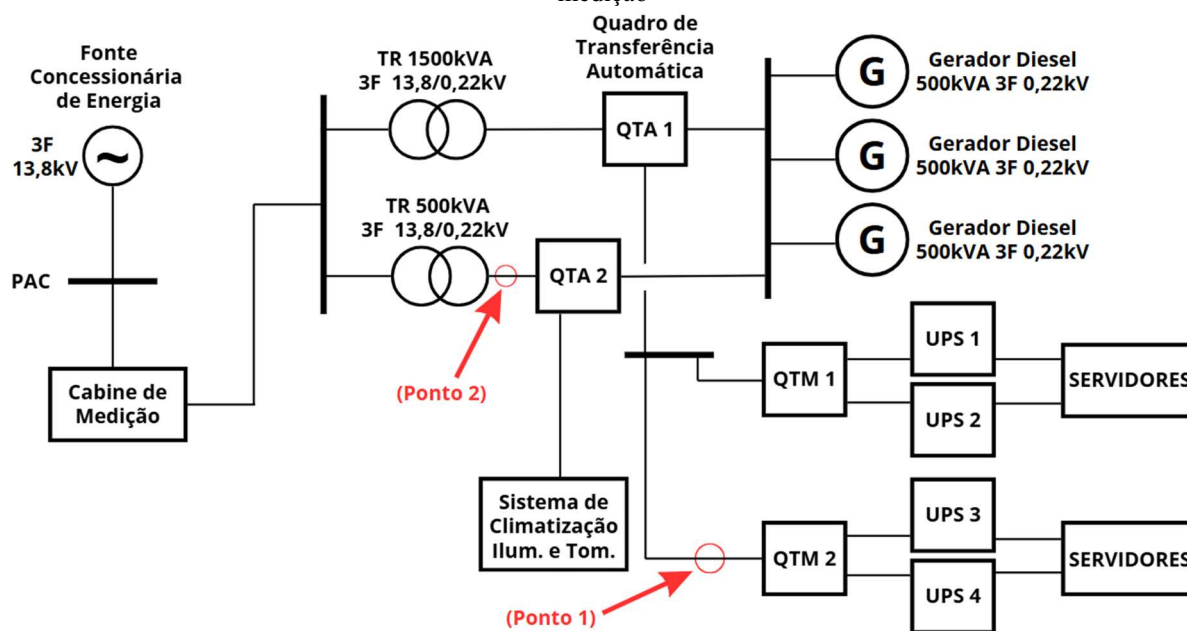
3.2 Apresentação do arranjo elétrico do data center

O *data center* analisado possui demanda média de aproximadamente 550 kW, sendo classificado como de médio porte (potência entre 500 kW e 5 MW). A instalação é suprida por uma rede de média tensão (MT) em 13,8 kV, a partir da qual derivam dois transformadores abaixadores que segregam fisicamente os dois grandes blocos de carga do empreendimento:

- Transformador de 1.500 kVA (13,8 / 0,22 kV), dedicado ao sistema de Tecnologia da Informação (TI), suprindo as quatro *UPS* de 300 kVA e, por meio delas, a carga crítica de servidores;
- Transformador de 500 kVA (13,8 / 0,22 kV), destinado ao sistema de climatização (*HVAC*), composto por condicionadores de ar de expansão direta (*DX*), três unidades de 50 Toneladas de Refrigeração (TR) e duas de 30 TR, totalizando 210 TR, além das cargas de iluminação e de tomadas do setor administrativo.

Essa segregação por transformador é determinante para a estratégia de medição adotada: ela permite avaliar separadamente a assinatura harmônica da carga de TI e a da carga de climatização, cujas naturezas elétricas são distintas. A Figura 6 apresenta o diagrama unifilar simplificado da instalação, no qual estão indicados os dois pontos de medição: o Quadro de Transferência Manual (QTM), a montante das *UPS* (Ponto 1), e o Quadro de Transferência Automática (QTA) USINA 500, no secundário do transformador de climatização (Ponto 2).

Figura 6 - Diagrama unifilar simplificado do *data center*, com os dois transformadores e os dois pontos de medição



Fonte: Autoria própria.

3.3 Equipamento de medição utilizado

Durante os levantamentos de campo, foi necessário realizar medições de QEE que apresentassem dados de tensão, corrente, potência, consumo e dados detalhados de distorções harmônicas de tensão e corrente até a 50ª ordem harmônica, conforme estabelecido pelo PRODIST Módulo 8. Para tal, foi adotado o medidor apresentado na Figura 7, com os seguintes dados técnicos:

- **Modelo:** Fluke 435 Series II Power Quality and Energy Analyzer (Ver Figura 7);
- **Fabricante:** Fluke;
- **Medição de Tensão (RMS):**
 - Faixa: até 1000 V *RMS* (Fase-Neutro);
 - Precisão: $\pm 0,1\%$ da leitura $\pm 0,05\%$ da faixa;
 - Normas aplicadas pelo medidor:
 - Métodos de medição: IEC 61000-4-30 (Classe A);
 - Harmônicos: IEC 61000-4-7;
- **Medição de Corrente:**
 - Precisão: $\pm 0,5\%$ da leitura (aparelho) + precisão do sensor;
 - Sensor de Corrente Fluke i430flex:
 - Faixa: até 6000 A;
 - Sobrecarga: 1,5 x Faixa de medição;
 - Precisão do sensor: Variável $\pm 0,7\%$ para 6000 A ou $\pm 0,5\%$ para 400 A;
 - Temperatura de Operação: 0° a 50° C;
 - Categoria dos Sensores: CAT IV 600V / CAT III 1000 V.
- **Capacidades de Análise (Módulos/Funções):**
 - Monitoramento da Qualidade de Energia (Conformidade com IEC Class A);
 - Captura de Transientes (Surtos) e Flutuação de Tensão (*Flicker*);
 - Análise de Perdas de Energia (Calculadora de Perdas Energéticas);
 - Registro de Eventos (*Sag/Swell*/Interrupções).
- **Taxa de amostragem:** 256 amostras por ciclo (50 / 60 Hz);
- **Base de tempo:** GPS ou Relógio Interno, assegurando sincronização Classe A.

Estes dados foram coletados em (FLUKE, 2026). Por meio deste equipamento foi possível registrar os principais parâmetros elétricos necessários para a medição de qualidade de energia, utilizando intervalos de integração de 10 em 10 minutos (conforme metodologia aplicada), sendo que neste trabalho dissertativo um foco especial foi dado ao fenômeno das distorções harmônicas de tensão e corrente.

A metodologia seguiu as orientações do PRODIST Módulo 8 (ANEEL, 2021), uma vez que esta instalação encontra-se conectada à rede de distribuição urbana.

Figura 7 - Analisador de Qualidade de Energia Fluke 435 Série II



Fonte: (FLUKE, 2026)

3.4 Medição de QEE realizada na UPS

O *data center* em questão possui quatro UPS de 300 kVA da marca Chloride e modelo 90-NET, onde duas unidades atuam como reserva/*backup* para as outras duas unidades em caso de falha na operação, conforme apresentado no diagrama unifilar apresentado na Figura 6. Desta forma, sabendo-se que a distribuição de carga é equilibrada entre elas e visando analisar da forma individual a característica harmônica de uma única UPS, o local escolhido para instalação do medidor foi no painel QTM (Quadro de Transferência Manual), conforme indicado pelo “Ponto 1” da Figura 6, sendo este painel responsável por direcionar a alimentação para a UPS 3 ou para a UPS 4 que é o *backup*/redundância da UPS 3, logo, qualquer que seja a UPS em operação, o medidor registrará os dados, segue na Figura 8 e na Figura 9, a sala e o painel com o medidor instalado, respectivamente.

Figura 8 - Banco de bateria, painel QTM e UPS



Fonte: Autoria própria.

Figura 9 – Painel QTM



Fonte: Autoria própria.

A medição realizada neste painel foi coletada após um período de 8 dias, tendo como resultado um banco de dados (*data frame*) gerado pelo medidor e, posteriormente, processado utilizando uma programação desenvolvida em código python, baseada nos parâmetros e limites estabelecidos na normativa do PRODIST Módulo 8.

Esta normativa estabelece que é necessário realizar o expurgo de medições que apresentaram interrupções no fornecimento, falhas ou inconsistências de registro, bem como aquelas associadas a condições operativas anormais do sistema, tais como manobras, atuações de proteção e eventos externos, de modo a garantir que a análise refletisse apenas as condições normais de operação, para isto, algumas medições foram expurgadas e selecionadas 1.008 medições válidas, correspondentes a 7 dias de registro com intervalo de integração de 10 minutos.

Finalizado o processamento do *data frame*, foi gerado um relatório em PDF apresentando os dados de distorções harmônicas de corrente até a 50ª ordem que serão necessários para prosseguir com a simulação do *data center* e gerados também dados complementares de QEE, tais como:

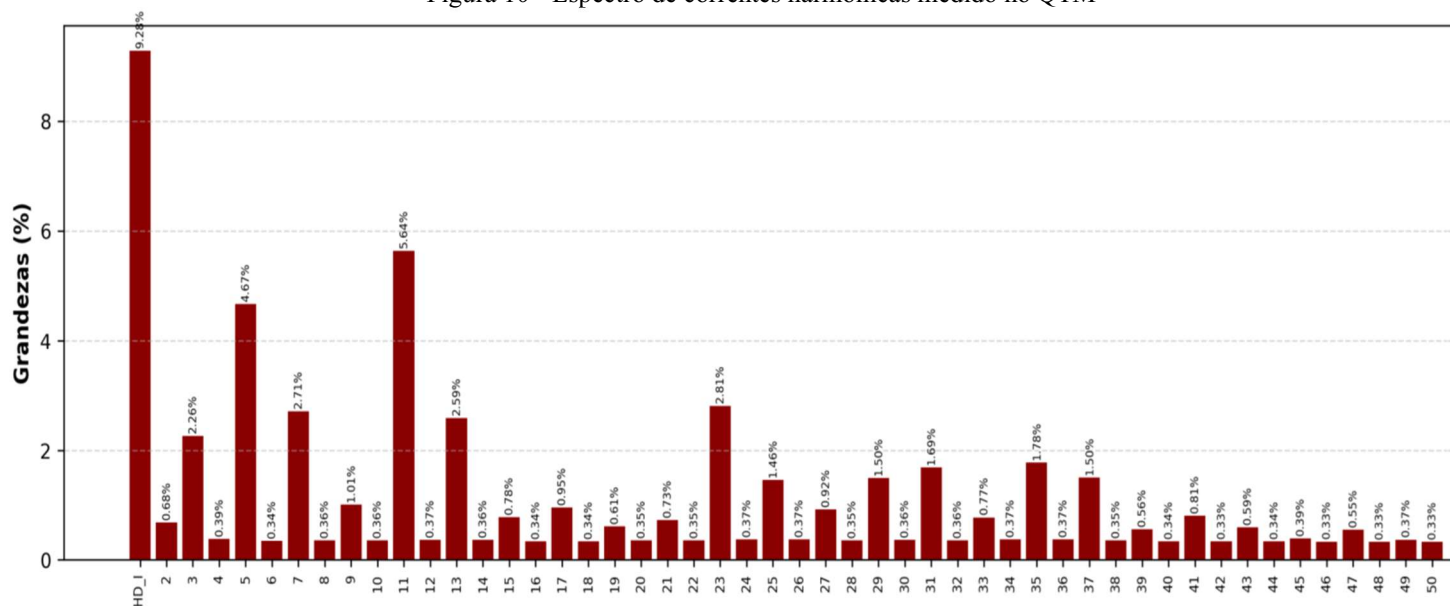
- Potências Elétricas (Ativa, Reativa e Aparente);
- Tensão em Regime Permanente
- Índices Duração Relativa de Transgressão Precária (DRP) e Duração Relativa de Transgressão Crítica (DRC);
- Fator de Potência;
- Distorções Harmônicas (Totais e Individuais de Tensão);
- Desequilíbrio de Tensão (Fator de Desequilíbrio);

- Flutuação de Tensão (Índices de Severidade *Flicker* Pst e Plt);
- Variação de Frequência;
- Interrupções de Longa Duração.

3.4.1 Resultados– Distorções Harmônicas

Após o processamento e a consolidação do *data frame* obtido durante o período de monitoramento na *UPS*, realizou-se a filtragem estatística dos dados conforme as diretrizes do PRODIST Módulo 8. O comportamento harmônico e o perfil de carregamento da infraestrutura de TI foram sintetizados a partir das 1008 medições válidas integralizadas. A Figura 10 apresenta o espectro médio das correntes harmônicas, os valores apresentados resultam da agregação das três fases do sistema trifásico, conforme o método da IEC 61000-4-7 adotado pelo instrumento, já a grandeza indicada no eixo “Y” corresponde, portanto, à amplitude média de cada ordem harmônica em relação à amplitude da componente fundamental (1ª ordem, H1).

Figura 10 - Espectro de correntes harmônicas medido no QTM



Fonte: Autoria própria.

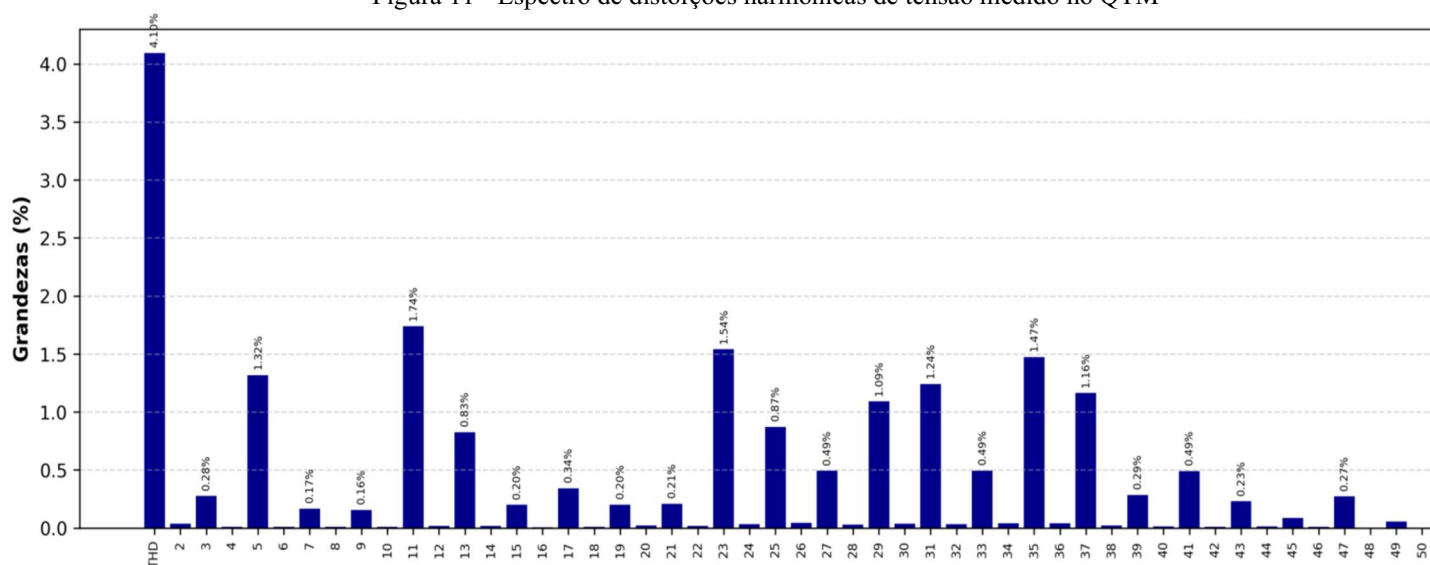
Nos resultados obtidos durante o monitoramento no painel QTM, observa-se um perfil harmônico de corrente com presença marcante das ordens características de sistemas de retificação de 12 pulsos, notadamente a 11ª (5,64%) e a 13ª ordem (2,59%), sendo o percentual baseado em relação à corrente nominal de 1013 A. Esse comportamento encontra-se alinhado às especificações do fabricante da UPS (Chloride 90-NET), que prevê um estágio de entrada constituído por dois retificadores a tiristores de 12 pulsos (Chloride Group PLC, 2008).

Contudo, chama a atenção a protuberância verificada na 5ª (4,67%) e 7ª ordem (2,71%), visto que estas ordens deveriam ser idealmente canceladas pelo arranjo de 12 pulsos. A presença expressiva dessas componentes não características pode ser atribuída a três hipóteses técnicas fundamentais observadas na instalação real:

- Presença de Retificador Secundário de 6 pulsos para Baterias: Internamente, além da ponte retificadora principal do elo CC, a UPS pode dispor de um circuito dedicado ao carregamento do banco de baterias, o qual opera com características de retificação de 6 pulsos, injetando correntes nas ordens de 5ª e 7ª ordem.
- Interação com Filtros Harmônicos Internos e Ressonância: A UPS possui filtros harmônicos internos projetados para atenuar as harmônicas superiores (como a 13ª ordem). A atuação desses elementos pode alterar a resposta em frequência da instalação local e causar pequenos fenômenos de ressonância ou alteração na impedância equivalente, atenuando a 13ª ordem e destacando a magnitude da 5ª ordem.
- Distorção Pré-existente na Rede (*Background Distortion*): Trata-se de uma medição realizada em ambiente de campo, e não em laboratório controlado. Eventuais distorções de tensão preexistentes na rede da concessionária ou o desequilíbrio entre as fases do sistema alimentador induzem a circulação de correntes harmônicas não características.

Complementarmente à análise das correntes, a Figura 11 expõe o espectro de distorções harmônicas de tensão médio das três fases registradas no ponto de monitoramento, apresentando uma Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) com percentil 95% consolidada em 4,10%. Como a coleta de dados ocorreu em um barramento operando em baixa tensão ($V_n \leq 1,0$ kV), os critérios de conformidade regulatória seguem as diretrizes da Tabela 2 do PRODIST Módulo 8 (ANEEL, 2021), que fixa o limite máximo para o indicador global (DTT95%) em 10,0%. O resultado obtido demonstra que o índice verificado em campo encontra-se em conformidade e com margem de segurança em relação ao teto normativo.

Figura 11 - Espectro de distorções harmônicas de tensão medido no QTM



Fonte: Autoria própria.

Segue na Tabela 1, um resumo dos demais dados coletados:

Tabela 1 - Resultado da medição na UPS

Descrição	Resultado
Tensão nominal FN média	127,39 V
Potência ativa média	317,70 kW
Potência reativa média	198,22 kvar
Potência aparente média	386,18 kVA
Demanda máxima ativa	326,27 kW
Demanda máxima aparente	396,38 kVA
Fator de potência (deslocamento)	0,82
Energia ativa demandada	53373,75 kWh
Energia aparente demandada	64878,77 kVAh

Fonte: Autoria própria.

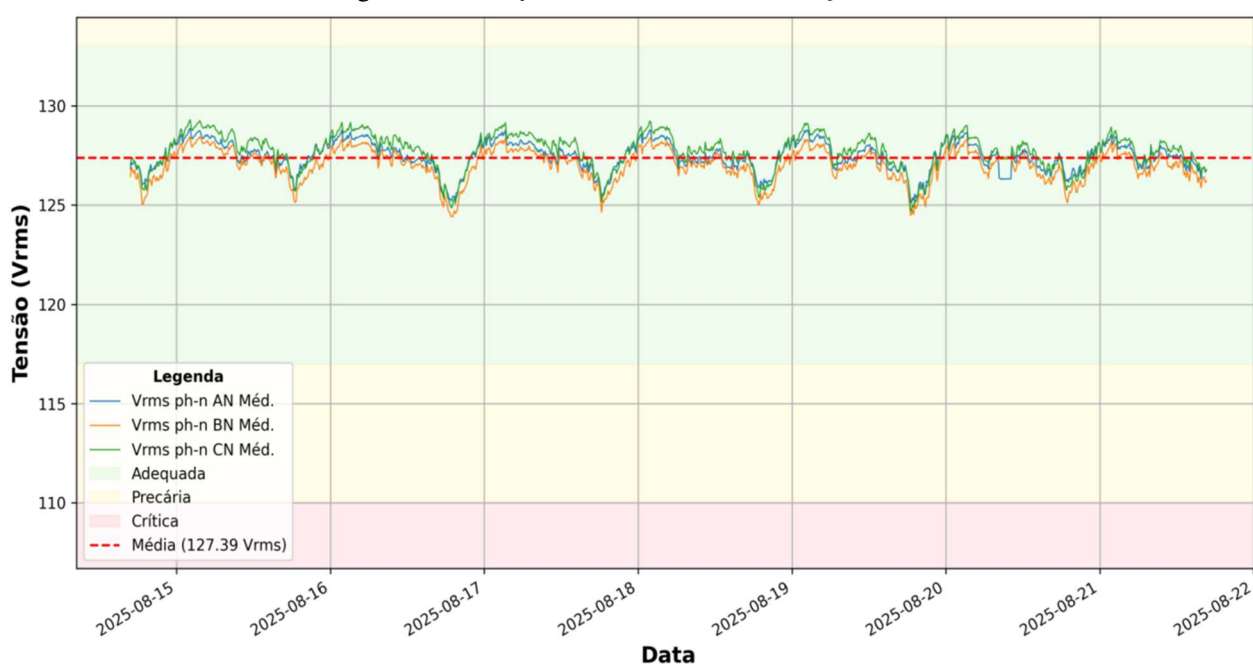
3.4.2 Resultados– Demais Indicadores de QEE

Além da análise das distorções harmônicas de tensão e corrente, foram avaliados os outros indicadores complementares de QEE, conforme estabelecido no PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2021), contemplando os parâmetros de tensão em regime permanente, duração relativa de variações de tensão precária e crítica (DRP e DRC), desequilíbrio de tensão e flutuação de tensão.

a) Tensão em regime permanente

O comportamento da tensão *RMS* da média das três fases e individual das fases A, B e C ao longo do período monitorado é apresentado na Figura 12. Observa-se que os valores de tensão permaneceram dentro da faixa classificada como adequada, conforme os limites normativos do PRODIST Módulo 8 para sistemas em baixa tensão.

Figura 12 - Medição dos níveis de tensão no QTM



Fonte: Autoria própria.

A tensão média entre as três fases registrada foi de 127,39 V e as demais fases apresentaram pequenas variações naturais ao longo do tempo, porém sem ocorrência de afundamentos (*sags*) ou elevações (*swells*) que caracterizassem condições precárias ou críticas.

b) Duração Relativa de Variações de Tensão (DRP e DRC)

Os indicadores de Duração Relativa de Variações Precárias (DRP) e Duração Relativa de Variações Críticas (DRC) foram igualmente avaliados conforme metodologia definida pelo PRODIST. Para o período analisado, ambos os índices apresentaram valor igual a 0%, indicando a inexistência de registros de tensão fora da faixa considerada adequada. Segundo o

PRODIST Módulo 8, os limites máximos admissíveis são de 3% para DRP e 0,5% para DRC. Assim, os resultados obtidos situam-se abaixo dos limites normativos.

c) Desequilíbrio de tensão

O fator de desequilíbrio de tensão foi avaliado por meio do indicador estatístico FD95%, calculado conforme as diretrizes normativas. O valor obtido foi de 0,31%, significativamente inferior ao limite máximo de 3% estabelecido pelo PRODIST para sistemas de baixa tensão.

d) Flutuação de tensão

A avaliação da flutuação de tensão foi realizada por meio dos índices de severidade Pst (curta duração) e Plt (longa duração), aplicando-se a estatística do percentil de 95%, conforme recomendado pelo PRODIST Módulo 8 apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Índices de Pst e Plt no QTM

Índice	Limite (pu)	Fase A (pu)	Fase B (pu)	Fase C (pu)
Pst 95%	1.00	0.12	0.12	0.11
Plt 95%	-	0.27	0.29	0.34

Fonte: Autoria própria.

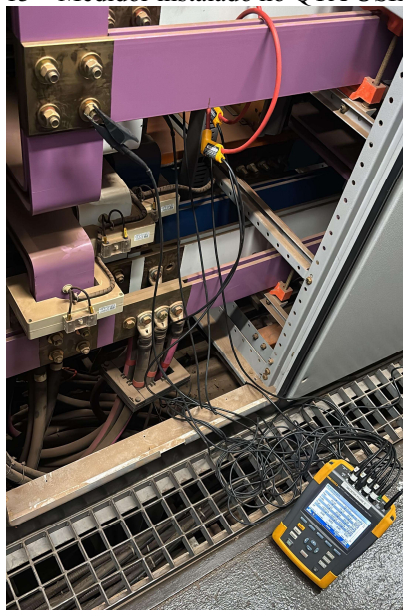
A Tabela 2 apresenta os valores consolidados para as três fases do sistema. Observa-se que os valores de Pst95% variaram entre 0,11 e 0,12, enquanto os valores de Plt95% situaram-se entre 0,27 e 0,34. Todos os resultados encontram-se abaixo do limite normativo de $Pst \leq 1,0$, não sendo estabelecido limite específico para Plt no contexto do PRODIST para esse nível de tensão.

3.5 Medição de QEE realizada no alimentador de climatização

Já o outro alimentador que é suprido pelo transformador de 500 kVA (Δ -Y), atende ao sistema de refrigeração (HVAC), composto por condicionadores de ar de expansão direta (DX), sendo três unidades de 50 TR e duas de 30 TR, totalizando 210 TR de capacidade nominal. Atende também cargas de tomadas e cargas de iluminação, que representam uma potência baixa, visto que há apenas um pequeno setor administrativo atuando no local.

Diante desta diversidade de cargas, a segunda medição foi realizada no secundário do transformador através do painel “QTA USINA 500”, conforme indicado pelo “Ponto 2” da Figura 6, permitindo mapear o comportamento elétrico geral do circuito, conforme apresentado na Figura 13 e Figura 14.

Figura 13 – Medidor instalado no QTA USINA 500



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - Medidor instalado no QTA USINA 500



Fonte: Autoria própria.

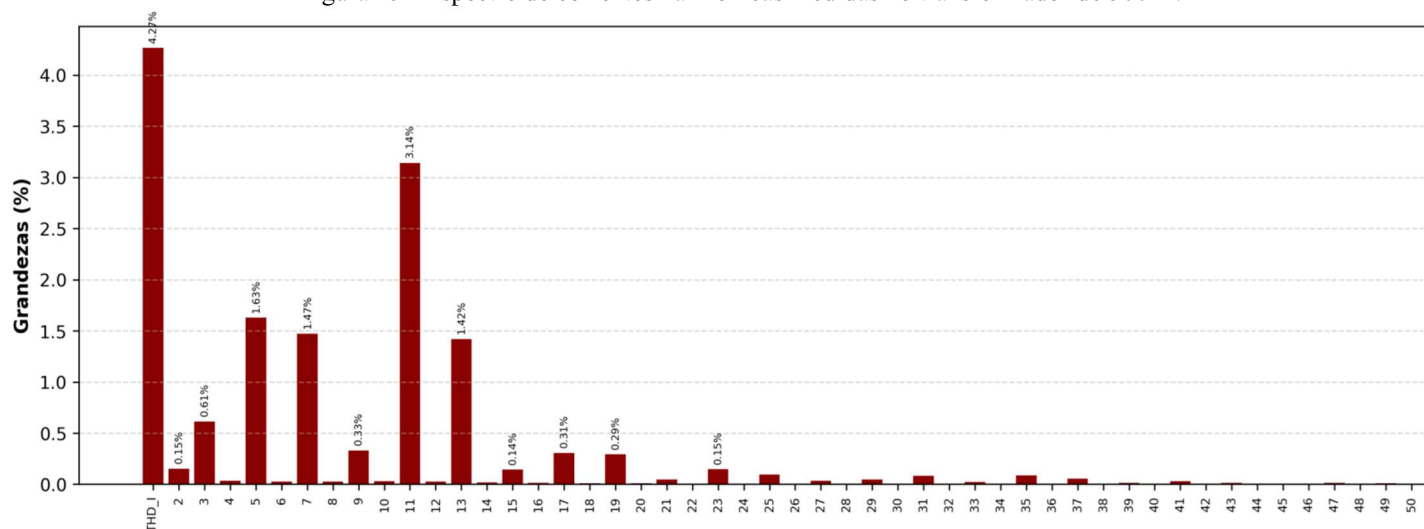
A medição realizada neste painel foi coletada também após um período de 8 dias, onde algumas medições foram desconsideradas e selecionadas 1008 medições válidas, ou seja, 7 dias com medições com intervalo de integração de 10 minutos.

3.5.1 Resultados – Distorções Harmônicas

Após o processamento e a consolidação do *data frame* obtido durante o período de monitoramento do alimentador do sistema de climatização, iluminação e tomadas, realizou-se a filtragem estatística dos dados e gerado os resultados.

A Figura 15 apresenta o espectro médio das correntes harmônicas injetadas, expressas em valor percentual em relação à componente fundamental de corrente que é de 647 A, onde é possível observar que dentre as diversas cargas que este painel alimenta, há cargas com características de retificadores de 6 e 12 pulsos.

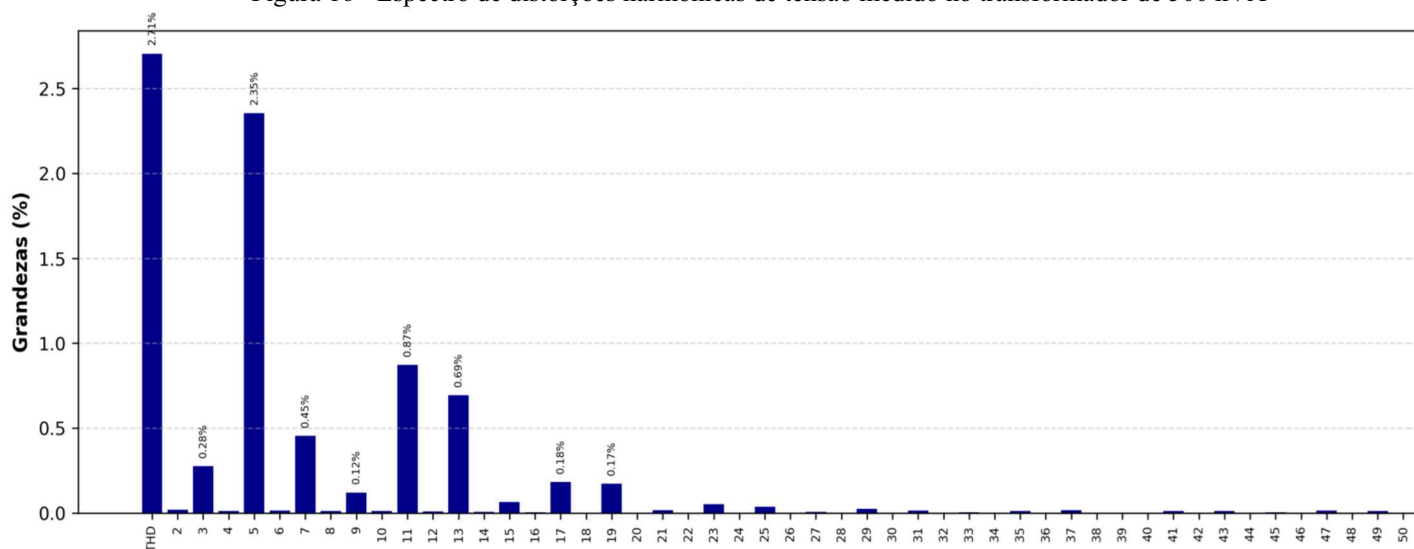
Figura 15 - Espectro de correntes harmônicas medidas no transformador de 500 kVA



Fonte: Autoria própria.

A Figura 16 expõe o espectro de distorções harmônicas de tensão médio das três fases registradas no ponto de monitoramento, apresentando uma DTT com percentil 95% consolidada em 2,71%. Como a coleta de dados ocorreu em um barramento operando em baixa tensão ($V_n \leq 1,0$ kV), os critérios de conformidade regulatória seguem as diretrizes da Tabela 2 do PRODIST Módulo 8 (ANEEL, 2021), que fixa o limite máximo para o indicador global (DTT95%) em 10,0%. O resultado obtido demonstra que o índice verificado em campo encontra-se em conformidade e com margem de segurança em relação ao teto normativo.

Figura 16 - Espectro de distorções harmônicas de tensão medido no transformador de 500 kVA



Fonte: Autoria própria.

Segue na Tabela 3, um resumo dos demais dados coletados.

Tabela 3 - Resultado da medição no transformador de 500 kVA

Descrição	Resultado
Tensão nominal FN média (V)	127,02 V
Potência ativa média (kW)	236,33 kW
Potência reativa média (kvar)	67,89 kvar
Potência aparente média (kVA)	246,49 kVA
Demanda máxima ativa (kW)	323,10 kW
Demanda máxima aparente (kVA)	338,30 kVA
Fator de potência (deslocamento)	0,96
Energia ativa demandada (kWh)	39703,47 kWh
Energia aparente demand. (kVAh)	41410,97 kVAh

Fonte: Autoria própria.

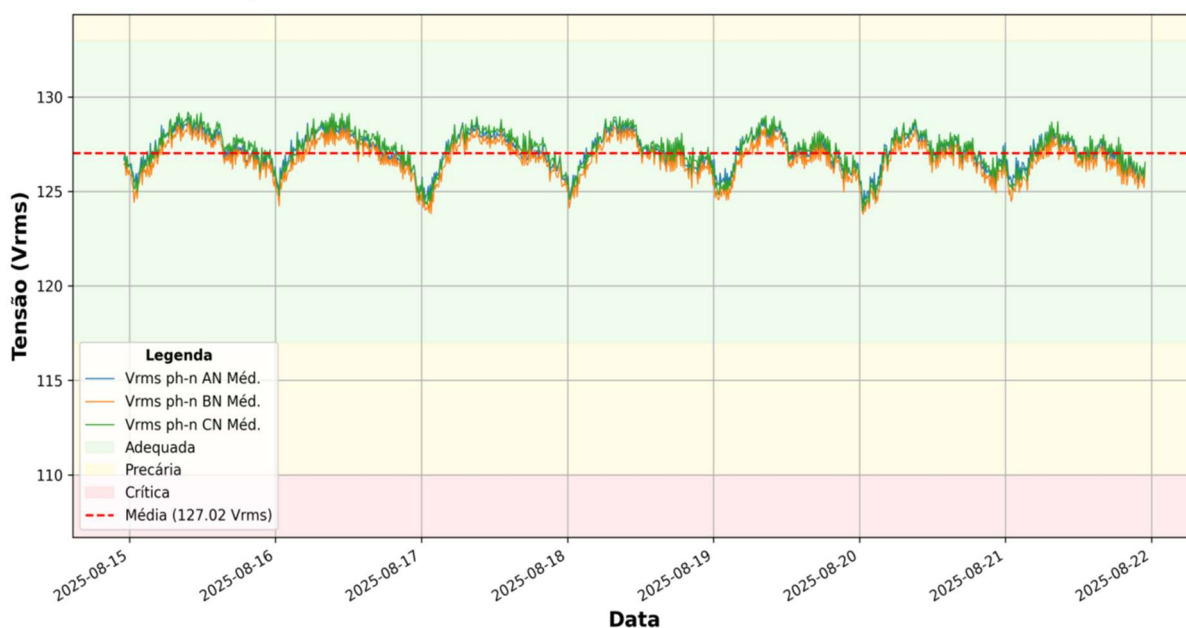
3.5.1 Resultados – Demais Indicadores de QEE

Além da análise harmônica, foram avaliados os demais indicadores de Qualidade da Energia Elétrica (QEE), conforme critérios estabelecidos no PRODIST – Módulo 8, incluindo tensão em regime permanente, duração relativa de variações de tensão precária e crítica (DRP e DRC), desequilíbrio de tensão e flutuação de tensão (*flicker*).

a) Tensão em regime permanente

Os níveis de tensão *RMS*, tanto da média das três fases quanto individualmente nas fases A, B e C, permaneceram dentro da faixa classificada como adequada ao longo de todo o período monitorado, conforme apresentado na Figura 17. A tensão média registrada foi de 127,02 V, não sendo observadas ocorrências de afundamentos ou elevações de tensão.

Figura 17 - Medição dos níveis de tensão no transformador de 500 kVA



Fonte: Autoria própria.

b) Duração Relativa de Variações de Tensão (DRP e DRC)

Os indicadores DRP e DRC apresentaram valores iguais a 0% durante o período analisado, indicando ausência de variações precárias ou críticas de tensão, permanecendo abaixo dos limites máximos estabelecidos pelo PRODIST.

c) Desequilíbrio de tensão

O fator de desequilíbrio de tensão, avaliado pelo indicador FD95%, resultou em 0,22%, valor significativamente inferior ao limite normativo de 3% para sistemas de baixa tensão.

d) Flutuação de tensão

A avaliação da flutuação de tensão foi apresentada na Tabela 4. Observa-se que os valores de Pst95% variaram entre 0,90 e 0,95, enquanto os valores de Plt95% situaram-se entre 0,83 e 0,88. Todos os resultados encontram-se abaixo do limite normativo de $Pst \leq 1,0$, não sendo estabelecido limite específico para Plt no contexto do PRODIST para esse nível de tensão.

Tabela 4 - Índices de Pst e Plt no transformador de 500 kVA

Índice	Limite (pu)	Fase A (pu)	Fase B (pu)	Fase C (pu)
Pst 95%	1.00	0.91	0.95	0.90
Plt 95%	-	0.83	0.88	0.83

Fonte: Autoria própria.

3.6 Considerações gerais a respeito das medições realizadas

A partir das medições realizadas nos dois pontos de monitoramento do *data center*, o painel QTM, representativo do alimentador de TI/*UPS*, e o painel QTA USINA 500, representativo do alimentador de climatização, iluminação e tomadas, percebe-se que todos os indicadores de QEE avaliados, individualmente em cada ponto, mantiveram-se dentro dos patamares aceitáveis estabelecidos pelo PRODIST Módulo 8 (ANEEL, 2021), não tendo sido verificada nenhuma não conformidade ao longo dos sete dias de medição válida em ambos os alimentadores.

Ao se comparar os dois pontos, observa-se que o alimentador de TI (QTM) apresentou um fator de potência mais baixo (0,82) e uma DHT de tensão mais elevada (4,10%) que o alimentador de climatização, que apresentou um fator de potência de 0,96 e DTT de 2,71%.

No que se refere à flutuação de tensão, nota-se uma diferença expressiva entre os dois pontos: os índices Pst95% e Plt95% registrados no transformador de 500 kVA (climatização) foram sensivelmente superiores aos verificados no QTM, ainda que dentro dos limites normativos. Esse comportamento é esperado, uma vez que os compressores e ventiladores do sistema de climatização operam com partidas e variações de carga mais frequentes ao longo do dia, gerando flutuações de tensão de maior severidade do que as observadas no alimentador de TI, cuja carga é predominantemente estável em regime permanente.

É importante destacar, ainda, algumas limitações inerentes à campanha de medição. O período de monitoramento de oito dias corridos, embora compatível com a metodologia do PRODIST Módulo 8 e suficiente para a obtenção de um padrão de comportamento representativo das cargas, não captura eventuais sazonalidades de operação do *data center*, como variações de carregamento de TI ao longo do ano ou diferentes regimes de operação do sistema de climatização associados a condições climáticas mais severas. Da mesma forma, as correntes harmônicas registradas em campo refletem não apenas o comportamento intrínseco das cargas não lineares da instalação, mas também a impedância harmônica da rede da concessionária no momento da medição, conforme discutido por Xu; Liu; Liu (2003), o que constitui uma fonte adicional de incerteza a ser considerada na interpretação dos resultados.

Não obstante essas limitações, as medições obtidas cumprem integralmente o objetivo proposto neste capítulo: caracterizar eletricamente, com base em dados reais de campo, os dois principais blocos de carga do empreendimento, TI/*UPS* e climatização, fornecendo os

parâmetros de potência, fator de potência e espectro harmônico necessários para subsidiar a etapa seguinte deste trabalho.

Dessa forma, os resultados consolidados nesta seção servem de referência para a validação da modelagem computacional desenvolvida no Capítulo IV, na qual as cargas não lineares de 6 e 12 pulsos serão representadas no ambiente MATLAB/Simulink de modo a reproduzir o comportamento harmônico aqui levantado.

CAPÍTULO IV

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES DO DATA CENTER

4.1 Considerações iniciais

Após a realização da coleta e do processamento dos dados de QEE do *data center* em análise, o próximo passo consistiu em realizar a sua modelagem computacional, a fim de se obter a representação fiel das cargas não lineares no ambiente MATLAB/Simulink (versão r2025a). Essa etapa é fundamental para viabilizar a simulação e obter o comportamento elétrico do empreendimento, assim como obter as correntes certificadas dos *data centers*, subsidiando os estudos subsequentes do impacto deste tipo de planta na rede básica, isso no âmbito dos requisitos de acesso estabelecidos pela Nota Técnica ONS NT 009/2016 (rev 3).

Para reproduzir os fenômenos observados em campo, a modelagem foi estruturada a partir da decomposição das potências e distorções registradas nos dois alimentadores principais da instalação, empregando modelos equivalentes de retificadores de 6 e 12 pulsos, cargas resistivas e filtros harmônicos, de modo a reproduzir a potência demandada, o fator de potência e o espectro harmônico de corrente de forma coerente com o coletado em campo.

Vale ressaltar que as correntes harmônicas medidas podem sofrer influência de distorções de tensão preexistentes na rede elétrica, e não apenas daquelas geradas pelas próprias cargas não lineares da instalação. No entanto, isolar a contribuição de cada parte é complexo, pois exige o conhecimento da impedância harmônica equivalente da concessionária e da planta de *data center*. Essa informação varia continuamente conforme as condições operacionais do sistema elétrico, inviabilizando sua obtenção prática, conforme descrito por Xu; Liu; Liu, (2003). Assim, para fins de modelagem e simplificação da análise, este trabalho considera as correntes harmônicas observadas como intrínsecas às cargas da instalação.

4.2 Modelagem da *UPS* e de seu carregamento

Para realizar a modelagem da *UPS* do *data center* baseado nas medições coletadas no painel "QTM" e utilizando o MATLAB/Simulink, foi simulado inicialmente a impedância do cabo que sai do transformador de 1500 kVA, seguida por um transformador de 300 kVA (Y-Y) que eleva a tensão de 220/380 V que é a tensão de operação do retificador e, posteriormente, os componentes internos do retificador.

Para simulação destes componentes internos, adotou-se como referência o *datasheet* da *UPS* existente no local, da marca Chloride e modelo 90-NET (Chloride Group PLC, 2008), onde o fabricante especifica que a *UPS* realiza a conversão da corrente trifásica proveniente da fonte CA para tensão CC regulada por um retificador de 12 pulsos, constituído por dois retificadores de tiristores de 6 pulsos operando com uma defasagem de 30° , além de integrar um filtro harmônico sintonizado na 13ª ordem e um filtro amortecido.

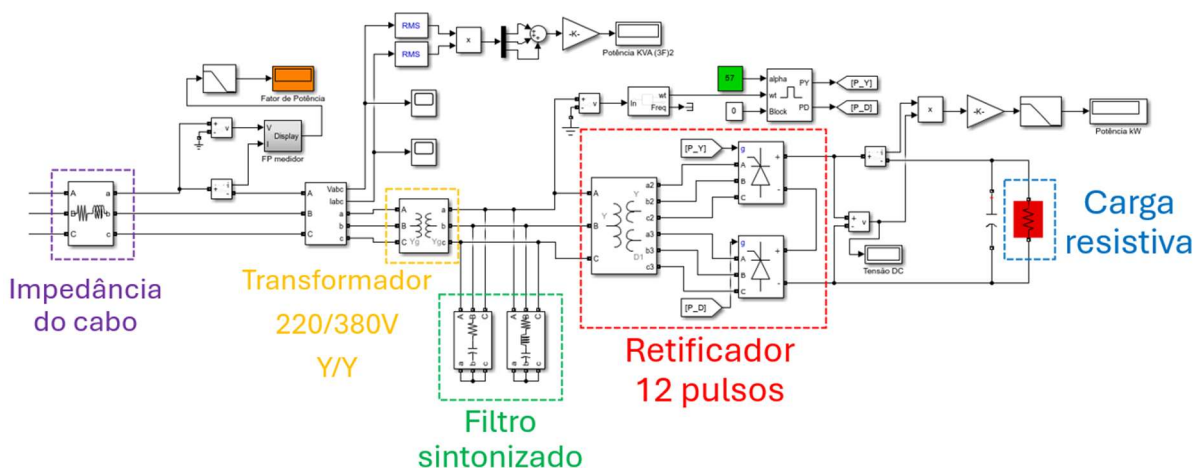
Já a simulação do banco de baterias não foi representada, em razão do foco do trabalho ser o regime permanente da demanda energética e pelo fato dos bancos de baterias não influenciarem na operação não linear do retificador 12 pulsos, que é o responsável pela geração das distorções harmônicas de corrente, pois estão conectados diretamente no barramento de corrente contínua.

Em paralelo ao banco de baterias, encontra-se o inversor de frequência, também conectado ao elo CC para realizar a conversão reversa para corrente alternada (CA). Este componente não foi incorporado ao modelo computacional visto que sua operação chaveada a jusante do barramento CC não exerce impacto direto nas distorções harmônicas de tensão e corrente propagadas para a rede de suprimento externa. Portanto, com o objetivo de simplificar a simulação sem perdas de exatidão nos resultados de interesse, o estágio de inversão foi substituído por uma carga resistiva equivalente, dimensionada com a potência ativa nominal do sistema, associada em paralelo a um banco de capacitores dimensionado para a estabilização e filtragem do ripple de tensão no elo CC.

A modelagem que ilustra a interconexão dessa arquitetura no MATLAB/Simulink é apresentada na Figura 18, representando uma unidade de *UPS*, embora na prática operativa o sistema conte com duas unidades idênticas operando em paralelo. A partir dessa estrutura,

tornou-se possível simular o comportamento do sistema e determinar o perfil das correntes harmônicas geradas conforme levantamento em campo.

Figura 18 - Diagrama em blocos da modelagem computacional da UPS no ambiente MATLAB/Simulink.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Modelagem do sistema de climatização

Para a modelagem computacional do sistema de climatização e das cargas auxiliares no ambiente MATLAB/Simulink, foi utilizado como referência os dados medidos no painel "QTA USINA 500", que está conectado ao secundário do transformador de 500 kVA. Conforme abordado anteriormente nas etapas de levantamento de dados, este alimentador específico possui cargas com diversas características elétricas e perfis de consumo variados, contemplando desde os compressores de climatização até os circuitos de iluminação e tomadas de uso geral.

Diante dessa heterogeneidade e com o objetivo de reproduzir o comportamento de distorção harmônica de corrente observado em campo, o modelo computacional foi estruturado através de uma associação em paralelo de diferentes blocos de carga. Inicialmente, modelou-se a impedância equivalente dos cabos alimentadores principais. À jusante, a rede ramifica-se para alimentar os seguintes elementos em paralelo:

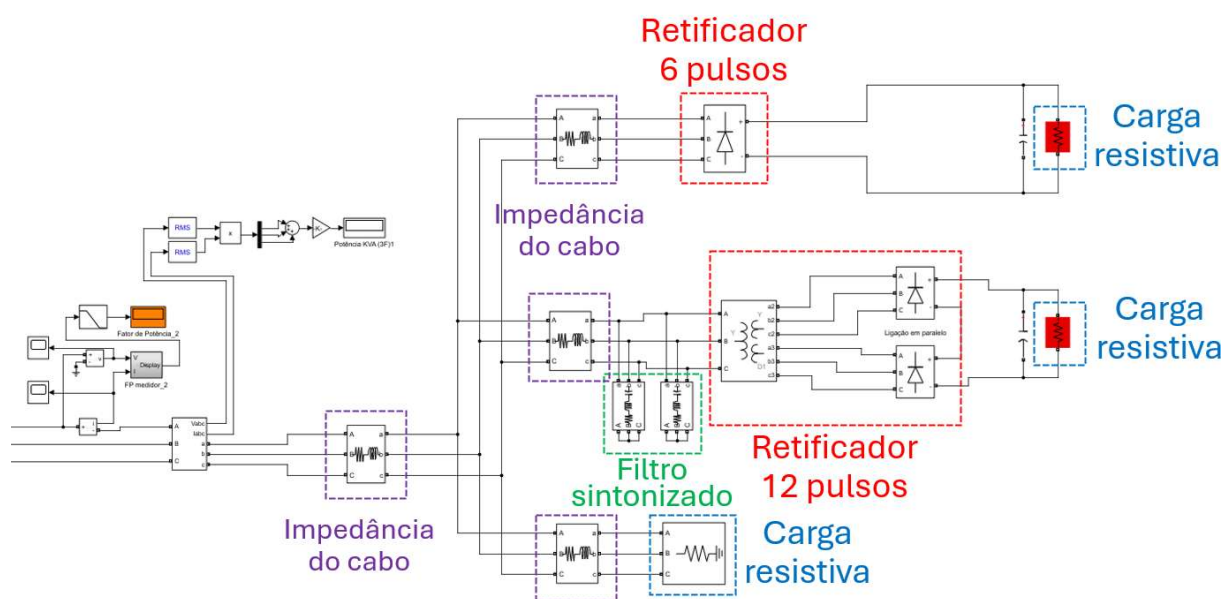
- **Retificador de 6 Pulsos:** Implementado com uma ponte a diodos acoplada a uma parcela de carga resistiva e capacitiva no elo CC, emulando o comportamento não linear dos inversores de frequência de 6 pulsos convencionais de parte das unidades condensadoras e compressores.

- **Retificador de 12 Pulsos:** Modelado por meio de um transformador defasador trifásico alimentando duas pontes a diodos em paralelo com filtragem capacitiva e carga resistiva no elo CC, representando os equipamentos de climatização com está tecnologia e os sistemas inversores de frequência de 12 pulsos.
- **Filtros Sintonizados:** Inseridos para representar os elementos passivos de mitigação e a atenuação natural de ordens harmônicas de 5ª e 13ª ordem presentes na infraestrutura elétrica instalada.
- **Carga Resistiva Linear:** Conectada diretamente ao barramento de corrente alternada (CA) para emular a parcela de cargas puramente resistivas do sistema, como parte do setor de iluminação e tomadas em regime estável.

Cada um desses ramais possui impedâncias de cabos individuais dedicadas, já os valores de potência e os parâmetros internos de cada bloco de carga foram definidos de forma empírica durante o processo de simulação. Essa calibração iterativa teve como finalidade ajustar as magnitudes de modo que a distorção harmônica de corrente total ($THDi$), a potência ativa agregada e o fator de potência obtidos no secundário do transformador apresentassem exatamente a mesma representação e perfil técnico registrados no levantamento de campo.

O diagrama em blocos que ilustra a interconexão final dessa arquitetura mista em paralelo no ambiente MATLAB/Simulink é apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Diagrama em blocos da modelagem computacional do sistema de climatização no ambiente MATLAB/Simulink.



Fonte: Autoria própria.

4.4 Caracterização das correntes harmônicas certificadas

Vale ressaltar que a presente modelagem está associada aos estudos de inserção de plantas de data center na rede básica de energia elétrica, seja sob a ótica da instalação acessada ou acessante à rede básica. Nesse contexto, torna-se necessário o estabelecimento das chamadas correntes certificadas que são utilizadas nas etapas subsequentes de simulação.

Em estudos de acesso e conexão, essas correntes certificadas correspondem na prática a um conjunto de correntes contendo múltiplas ordens harmônicas, representativas do comportamento não linear da instalação. Via de regra, a definição formal de correntes certificadas encontra respaldo em normas técnicas internacionais, a exemplo da ABNT NBR IEC 61400-21: Turbinas eólicas - Parte 21 (ABNT, 2022), que estabelece procedimentos específicos para aerogeradores. Entretanto, não há, até o presente momento, normas equivalentes que definam correntes certificadas para tipos de cargas como data centers.

No caso específico de uma planta de data center, a determinação das correntes certificadas apresenta maior complexidade quando comparada a instalações compostas por um único tipo de equipamento. Isso se deve ao fato de que o empreendimento é caracterizado pela coexistência de diferentes subsistemas com comportamentos elétricos distintos, destacando-se, principalmente, as cargas não lineares associadas aos sistemas de *UPS* e aquelas provenientes dos inversores de frequência empregados nos sistemas de climatização (*HVAC*). Assim, a corrente harmônica total injetada no sistema elétrico resulta da composição simultânea de múltiplas fontes de distorção, o que inviabiliza a adoção direta de metodologias normativas concebidas para equipamentos unitários.

Além disso, a operação típica de data centers de médio e grande porte ocorre majoritariamente em regime de potência praticamente constante e próxima à potência nominal, em razão do processamento de dados ocorrer 24h por dia, tendo todos os servidores ligados neste período. Dessa forma, não se mostra tecnicamente pertinente a adoção de abordagens baseadas em variações significativas de potência para a determinação das correntes certificadas, conforme ocorre em outros tipos de cargas ou unidades geradoras, como os aerogeradores que varia a potência em razão da intensidade do vento. Nesse sentido, a presente modelagem considera a operação em regime permanente, em condição de potência plena, como cenário representativo para a caracterização das correntes harmônicas associadas à planta analisada.

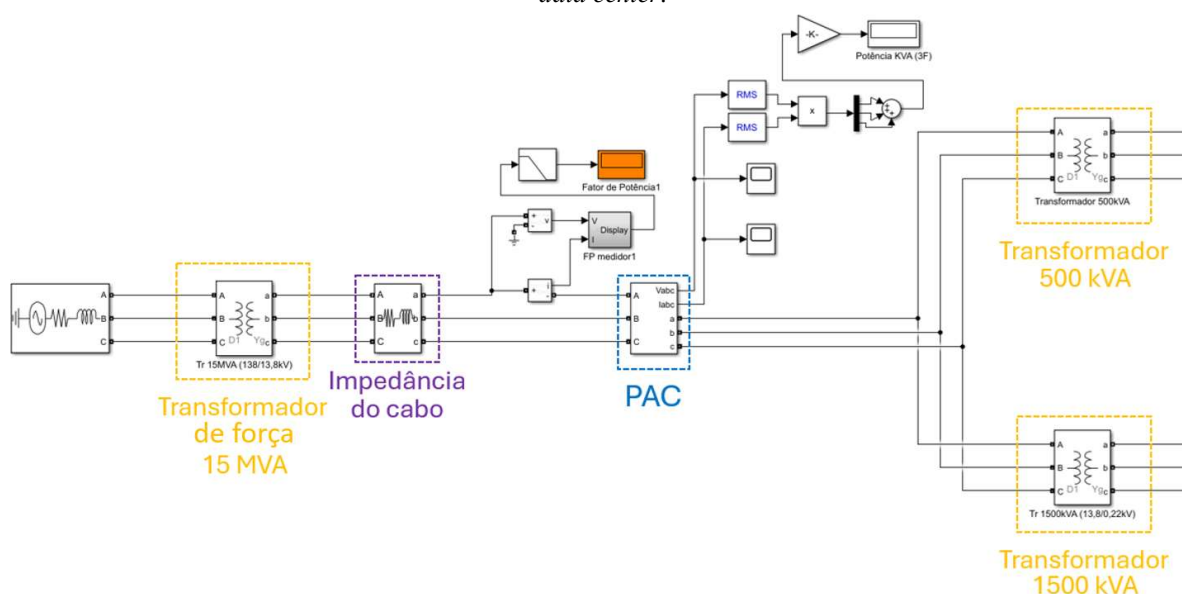
4.5 Integração do modelo computacional

Diante dessas particularidades apresentadas no subitem anterior, a obtenção das correntes certificadas deste *data center* em análise, procedeu-se em consonância com os desenvolvimentos apresentados nesta seção da dissertação.

Após a modelagem individualizada e a respectiva validação dos resultados dos subsistemas de TI (*UPS*) e de climatização (*HVAC*) em baixa tensão, as cargas foram consolidadas e acopladas ao modelo equivalente da rede de suprimento da concessionária local. Essa etapa visa representar o caminho elétrico completo desde a subestação de transmissão até os barramentos internos do empreendimento.

A topologia simplificada da rede de distribuição implementada no ambiente MATLAB/Simulink é ilustrada na Figura 20.

Figura 20 - Diagrama em blocos da modelagem equivalente da rede de distribuição e acoplamento das cargas do *data center*.



Fonte: Autoria própria.

Este circuito equivalente compreende, inicialmente, a fonte de alimentação com potência de curto-circuito elevada (150MVA) que representa o Sistema Interligado Nacional (SIN), conectada ao transformador de potência da subestação de distribuição urbana da cidade com capacidade nominal de 15 MVA e relação de transformação de 138 / 13,8 kV. A partir do barramento de média tensão (MT) da subestação, modelou-se a impedância equivalente dos cabos elétricos, cujos parâmetros de resistência e indutância foram calculados com base na distância média real entre a subestação existente e o ponto de entrega da energia elétrica da

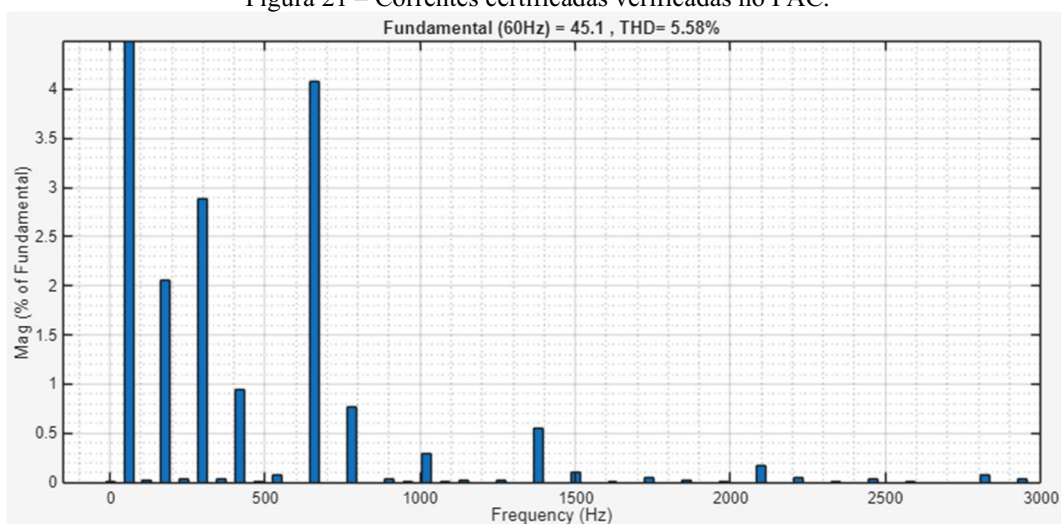
concessionária ao data center. Esta análise tem por objetivo preparar o arranjo elétrico em questão para uma posterior avaliação dos impactos de plantas de data center na rede básica de energia, no contexto da QEE.

No ponto de entrega da energia elétrica da concessionária, localiza-se o PAC, onde delimita-se a fronteira operativa e jurídica entre a rede de distribuição aérea da concessionária e os ramais de entrada do consumidor. Consequentemente, este foi o ponto estratégico adotado para determinar as correntes certificadas que o empreendimento efetivamente injeta no sistema elétrico em média tensão.

A composição destas correntes certificadas que cruzam o PAC é governada pela demanda interna da instalação. Na rede interna do *data center*, o barramento em 13,8 kV ramifica-se para alimentar as duas subestações transformadoras rebaixadoras detalhadas nas seções anteriores: o transformador de 1500 kVA (13,8 kV / 0,22 kV), dedicado ao suprimento da infraestrutura crítica de TI, e o transformador de 500 kVA (13,8 kV / 0,22 kV), destinado aos sistemas de climatização, tomadas e iluminação.

Como resultado direto dessa composição de cargas elétricas operando em regime permanente, obteve-se o perfil consolidado de correntes certificadas no PAC. O espectro harmônico de corrente resultante na média tensão, extraído a partir da simulação de fluxo harmônico nesse ponto de entrega, é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Correntes certificadas verificadas no PAC.



Fonte: Autoria própria.

Com a implementação do modelo computacional no MATLAB, tornou-se possível consolidar as correntes certificadas resultantes injetadas na média tensão. Esse bloco de dados serve como o elemento de entrada fundamental para o acoplamento com ferramenta

especializada em análise de fluxo de harmônico em nível de rede básica (HarmZs). A partir desse modelo base de carga representativo, torna-se viável expandir a escala de análise para cenários de elevada potência agregada, integrando as características dinâmicas de impedância da rede externa de alta tensão para a avaliação sistemática do impacto coletivo desses empreendimentos e o dimensionamento de suas respectivas estruturas de mitigação que será apresentado no próximo capítulo.

Portanto, percebe-se que no presente trabalho dissertativo tem-se uma análise criteriosa de um *data center* de porte médio conectado ao sistema de distribuição, o qual será base para o estudo do impacto deste tipo de carga, todavia, considerando, a partir deste momento, a rede básica de energia elétrica brasileira. Agindo assim pode-se extrapolar a planta de *data center* para potências mais elevadas e, conseqüentemente, mais condizentes com os empreendimentos que serão conectados nos próximos anos no Brasil.

Para maiores detalhes sobre a parametrização dos blocos, estrutura dos circuitos e acesso ao arquivo de simulação disponibilizado publicamente no *MATLAB Central File Exchange*, verifique o Apêndice C deste trabalho.

CAPÍTULO V

5 ESTUDO DE ACESSO E ANÁLISE HARMÔNICA DO COMPLEXO DE DATA CENTERS NO AMBIENTE HARMZS

5.1 Considerações iniciais

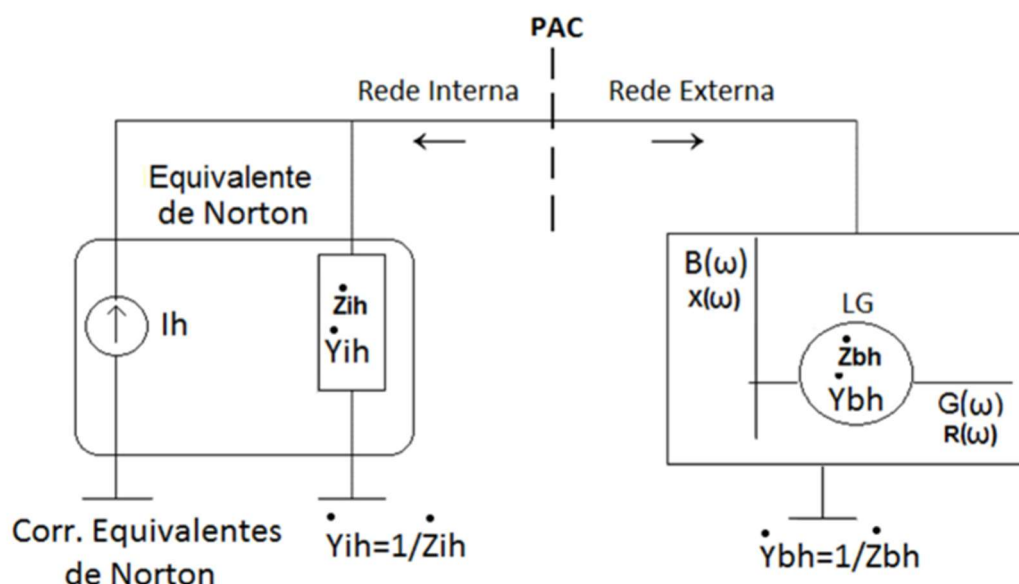
Com o objetivo de avaliar o impacto da conexão de um *data center* do tipo *hyperscale* sobre a QEE no PAC, este capítulo apresenta o estudo de desempenho harmônico da instalação, com ênfase na distorção harmônica de tensão. A análise foi conduzida em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela Nota Técnica ONS NT 009/2016 (rev 3), no que se refere aos estudos de desempenho harmônico aplicáveis aos acessos à Rede Básica, bem como aos critérios de avaliação definidos pelo ONS Submódulo 2.8 (2016) dos Procedimentos de Rede .

Segundo a NT 009/2016, os estudos de desempenho harmônico devem avaliar o efeito da instalação acessante sobre o sistema elétrico considerando múltiplos cenários operativos da Rede Básica, abrangendo topologias presentes e futuras, diferentes níveis de carregamento (leve, médio e pesado) e condições degradadas de operação segundo o critério *N-1*, que corresponde à análise do sistema após a indisponibilidade de um único componente, como uma linha de transmissão ou um transformador, sem que isso implique colapso global da operação do sistema. Tal procedimento visa assegurar que os indicadores de QEE no PAC permaneçam dentro dos limites regulamentares mesmo em configurações menos favoráveis da rede.

A NT 009/2016 estabelece ainda que a análise deve ser fundamentada na representação da Rede Interna por um equivalente de Norton e da Rede Externa por meio de um Lugar Geométrico (LG) das impedâncias ou admitâncias harmônicas vistas do PAC. Conforme ilustrado na Figura 22, a metodologia representa a instalação acessante por uma fonte de corrente harmônica equivalente em paralelo com sua admitância harmônica equivalente, enquanto a Rede Básica é representada por um LG capaz de sintetizar a variabilidade de suas

condições operativas. Essa formulação permite determinar, para cada ordem harmônica analisada, a condição mais crítica de interação entre o acessante e a rede externa, identificando os maiores valores possíveis de distorção de tensão no ponto de conexão.

Figura 22 - Representação do equivalente de Norton da Rede Interna e do Lugar Geométrico da Rede Básica vistos do PAC



Fonte: ONS NT 009/2016 (Rev. 03)

Com base nessas premissas, adotou-se o software HarmZs, desenvolvido pelo CEPEL, para a modelagem do sistema elétrico do acessante e para a obtenção das respostas harmônicas no ponto de conexão em 230 kV. A metodologia empregada considerou a agregação das cargas não lineares internas, a representação detalhada da topologia do empreendimento e a construção do equivalente harmônico da Rede Básica conforme os critérios prescritos pela NT 009/2016.

5.2 Fundamentação acerca metodologia estabelecida pela NT 009/2016

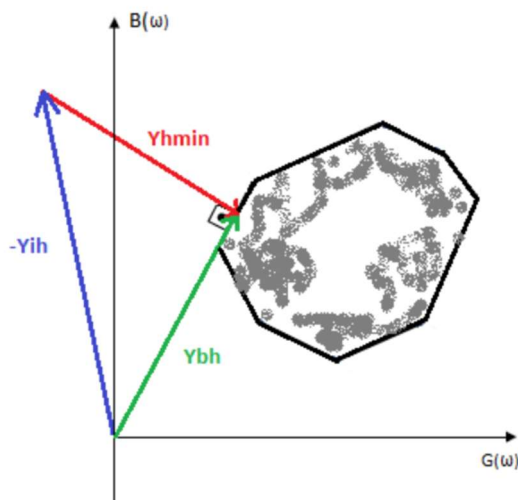
De acordo com a NT 009/2016, o estudo de distorção harmônica de tensão no PAC deve ser conduzido, preferencialmente, por meio do método do Lugar Geométrico para representação da impedância da Rede Externa, tendo em vista as limitações associadas aos estudos convencionais de fluxo harmônico para toda a faixa de frequências de interesse. Por outro lado, nessa mesma abordagem, a Rede Interna do acessante é representada por um equivalente de Norton, composto pela fonte de correntes harmônicas e pela admitância harmônica equivalente

da instalação, enquanto a Rede Externa é representada por um conjunto de impedâncias ou admitâncias harmônicas obtidas para diferentes cenários operativos do sistema elétrico.

Segundo a norma, as impedâncias/admitâncias da Rede Externa que compõem o LG devem ser determinadas, a partir do PAC, considerando a instalação acessante desconectada, uma vez que o efeito do circuito interno já se encontra representado no equivalente de Norton. Esse cuidado evita a dupla contabilização da admitância da instalação e garante a consistência física da composição final.

A representação conceitual convertida para o plano complexo de admitâncias (B versus G) é ilustrada na Figura 23, evidenciando que o cálculo da máxima distorção harmônica de tensão no PAC decorre da interação entre a corrente harmônica equivalente da instalação e o ponto do LG da Rede Básica que minimiza o módulo da admitância equivalente total. Note-se que um LG originalmente expresso em termos de impedância ($\dot{Z}_{ih}$) pode ser convertido em LG de admitância ($\dot{Y}_{ih}$), no plano complexo B versus G, por meio de inversão matemática do LG de impedância entre os dois planos complexos (ONS NT 009/2016, 2019).

Figura 23 - Ilustração gráfica do método do LG tipo Polígono de “n” Lados



Fonte: ONS NT 009/2016 (Rev. 03)

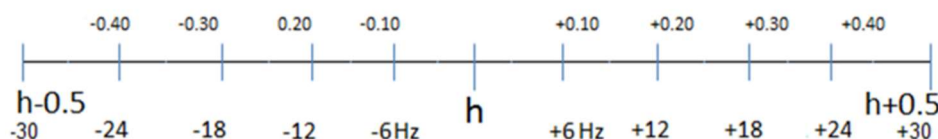
O valor da impedância representativa da Rede Básica pertencente ao LG que maximiza a tensão harmônica no PAC, para cada ordem harmônica (h), é obtido por cálculo geométrico nesse plano complexo de admitâncias, de modo que a tensão harmônica máxima é dada por $V_{hmax} = I_h/Y_{hmin}$. O denominador Y_{hmin} corresponde ao módulo da soma vetorial em paralelo entre a admitância de Norton equivalente da Rede Interna do Agente ($\dot{Y}_{ih} = 1/\dot{Z}_{ih}$) e a admitância correspondente ao ponto do envelope do LG de admitância da Rede Básica ($\dot{Y}_{bh}$)

que minimiza esse módulo (ONS, 2019). Geometricamente, esse ponto no envelope é encontrado como a menor distância entre o extremo do vetor $-\dot{Y}_{ih}$ e o LG de admitância harmônica da Rede Básica, sendo este último representado, no caso da Figura 23, pelo contorno do polígono de "n" lados que envolve a nuvem de pontos de admitância calculada para a Rede Externa.

Em termos físicos, isso significa que a condição mais severa de distorção harmônica não depende apenas da intensidade da corrente harmônica injetada pela instalação, mas também da resposta em frequência do sistema elétrico externo representada, neste caso, pela geometria do polígono que delimita as incertezas e variações da impedância/admitância da Rede Básica ao longo do tempo e dos diferentes cenários operativos considerados, conforme metodologia do LG recomendada pelo ONS (NT 009/2016 – Rev. 03) para estudos de desempenho harmônico (ONS, 2019).

Quanto ao intervalo e ao passo de varredura, a NT 009/2016 prescreve, para o LG do tipo Polígono de “n” Lados, o intervalo $(h-0,5, h, h+0,5)$ com passo harmônico de $\pm 0,1$, o que corresponde a ± 6 Hz em torno da frequência central, em um sistema de 60 Hz. Esse refinamento é essencial porque os máximos de distorção nem sempre ocorrem exatamente na ordem inteira, podendo surgir em frequências adjacentes em razão de fenômenos ressonantes. A Figura 24 ilustra o intervalo de análise harmônica adotado para a formação do LG do tipo polígono.

Figura 24 - Intervalo harmônico adotado para a construção do Lugar Geométrico do tipo polígono de n lados, considerando a faixa $h \pm 0,5$



Fonte: ONS NT 009/2016 (Rev. 03)

A norma também prevê que, quando houver múltiplas fontes harmônicas na instalação, a corrente total equivalente não deve ser determinada por simples soma aritmética, uma vez que há dificuldade em se estabelecer os ângulos de fase entre as correntes geradas pelas diferentes fontes independentemente controladas para uma mesma ordem harmônica. Por essa razão, a NT 009/2016 prescreve que a corrente resultante seja obtida pela formulação proposta pela IEC 61000-3-6, reproduzida na Equação 1:

$$I_h = \sqrt{\sum_{i=1}^m I_{h,i}^\alpha} \quad (1)$$

Sendo:

I_h = a corrente harmônica resultante da ordem

h , = ordem harmônica

m = o número total de fontes

α = o fator de agregação

O fator α assume valor 1,0 para ordens inferiores à 5ª, 1,4 para ordens entre a 5ª e a 10ª e 2,0 para ordens superiores à 10ª, conforme estabelecido pela referida norma. Tais valores são definidos para a pior condição de combinação, ou seja, para correntes harmônicas em fase. Como exceção, a norma admite o emprego de $\alpha = 1,2$ para harmônicas não características de baixa ordem, a exemplo da 3ª ordem, que comprovadamente resultem defasadas, desde que tal comportamento seja verificado por meio de medições sincronizadas das correntes harmônicas injetadas pelas diferentes fontes da instalação. A Equação 1, apresentada na norma como base para a avaliação da corrente total equivalente, é aqui mencionada com o objetivo de contextualizar o procedimento normativo. Ressalta-se que, no presente estudo, os resultados foram obtidos por meio da agregação através de simulação, não sendo necessária a aplicação direta da referida equação.

Tal cuidado é particularmente importante em empreendimentos como *data centers*, nos quais a emissão harmônica resulta da superposição de diversos equipamentos eletrônicos de potência operando simultaneamente, *UPS* com retificadores, inversores de frequência dos sistemas de climatização e demais conversores estáticos, cujas correntes harmônicas de mesma ordem raramente estão em fase. A adoção do fator de agregação evita, assim, tanto a superestimação decorrente da soma aritmética direta quanto a subestimação que ignoraria a contribuição conjunta dessas fontes.

5.3 Modelagem da Rede Interna do Data Centers e definição do PAC com a Rede Externa

A modelagem da Rede Interna foi desenvolvida com o objetivo de reproduzir a magnitude da carga, a distribuição topológica do empreendimento e o efeito cumulativo das emissões harmônicas geradas pelos equipamentos não lineares. Para tanto, as correntes

certificadas obtidas no Capítulo 4 são agregadas em módulos equivalentes e posteriormente escalonadas para representar um *data center* do tipo *hyperscale*.

Para a inserção dos dados de entrada no software HarmZs (cartão DSRC do arquivo .hzs), as correntes harmônicas equivalentes de Norton da Rede Interna foram parametrizadas considerando o pior cenário operativo em termos de desfasamento angular.

Tendo em vista a dificuldade prática de se determinar com exatidão a defasagem angular dinâmica entre as diversas fontes da instalação em campo, adotou-se uma abordagem conservadora: para cada ordem harmônica, os ângulos de fase foram arbitrados de modo a maximizar o acoplamento e a superposição das correntes injetadas pelas múltiplas fontes internas. Por exemplo, alinhando fases em 0° , 135° , 315° , conforme especificado no cartão de fontes de corrente DSRC, apresentado no Apêndice B. Essa premissa garante que os níveis de distorção de tensão calculados no PAC reflitam a condição mais severa possível de injeção harmônica, atendendo com folga e rigor aos critérios de conservadorismo exigidos pelo ONS nos estudos de acesso à Rede Básica.

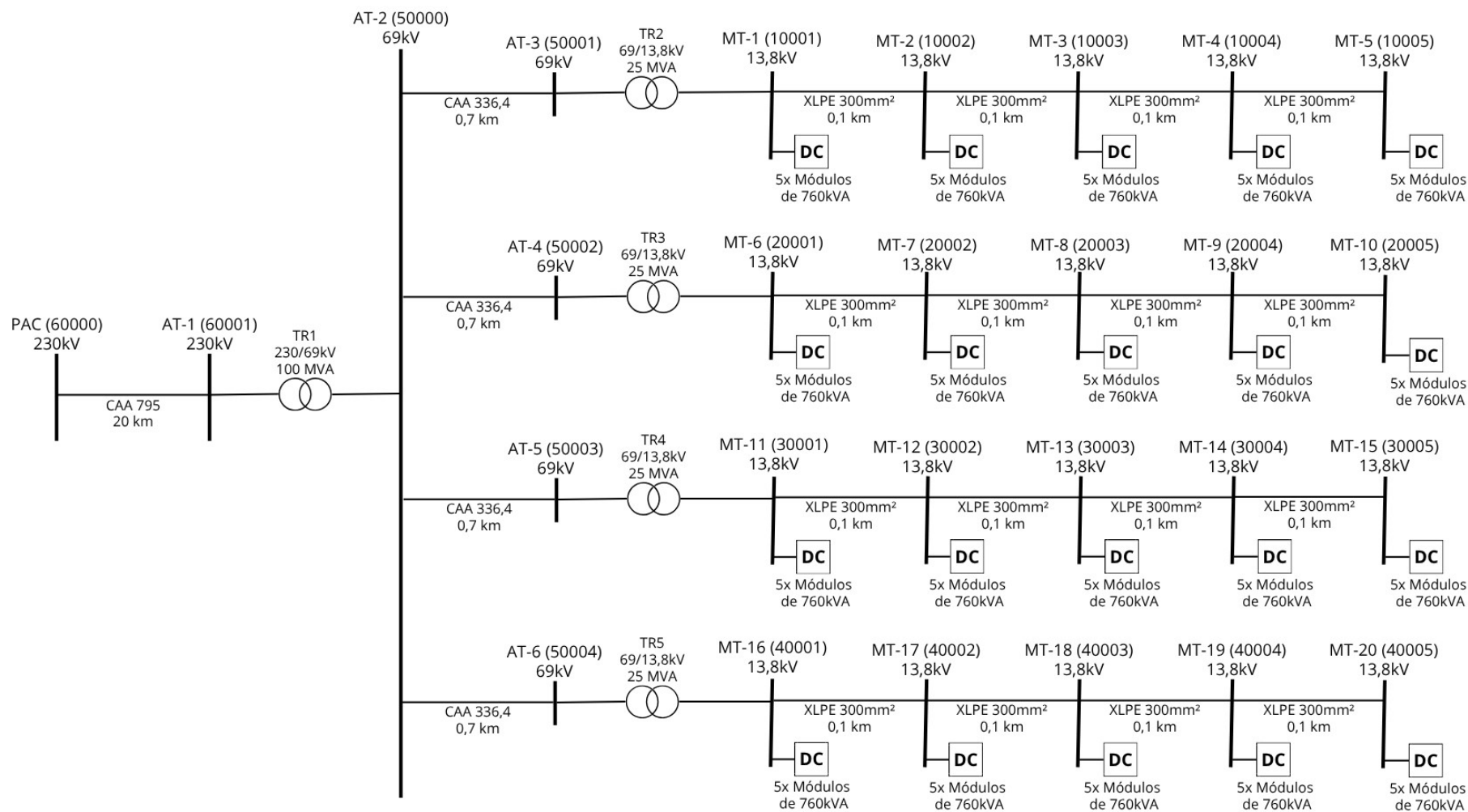
Inicialmente, cinco módulos de *data centers* foram agrupados para representar no diagrama unifilar o que seria a representação de um prédio de *data center*, tendo a demanda elétrica e o perfil de emissão harmônica de uma edificação deste porte. Em seguida, cinco destas edificações foram interconectadas de forma radial através de um barramento de 13,8 kV, dispostos com um espaçamento de 100 m entre cada prédio. Esse arranjo permitiu representar não apenas a agregação de carga, mas também os efeitos associados à distribuição espacial da instalação.

O conjunto resultante correspondeu a um subsistema com potência aparente da ordem de 19 MVA, alimentado por um transformador de 25 MVA, na relação 69/13,8 kV. Para representar o toda a instalação, essa topologia foi replicada quatro vezes em paralelo, totalizando aproximadamente 76 MVA de potência instalada, tal nível de potência foi adotado por representar, *data centers* de grande porte conectados à Rede Básica e por sua magnitude ser suficiente para produzir impactos relevantes de distorção harmônica de tensão no ponto de acoplamento comum da rede básica.

Esta potência global foi então concentrada em um barramento coletor de 69 kV, suprido por uma subestação principal com transformador de 100 MVA, na relação 230/69 kV. A conexão com a Rede Básica foi modelada por uma linha aérea de 20 km, com condutor CAA 795 kcmil, até a subestação de conexão selecionada no presente estudo. Neste quesito, ressalta-se que o estudo vai considerar, conforme na sequência será melhor detalhado, a Subestação

Pecém II, localizada no Ceará, como o PAC desta análise, sendo o nível de tensão de 230 kV, em consonância com a ilustração da Figura 25.

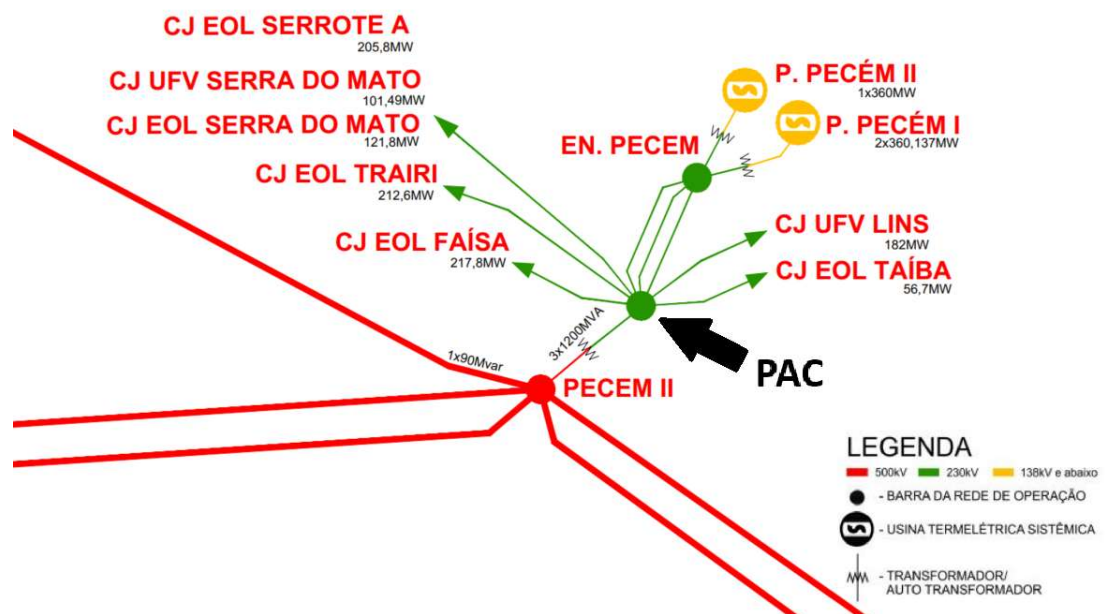
Figura 25 - Representação da interligação dos módulos de *data centers* com a rede básica 230kV



Fonte: Autoria própria.

A adoção da Subestação Pecém II (230 kV) como equivalente da rede externa foi em razão da necessidade de validar o estudo em um cenário elétrico real, garantindo resultados abrangentes. Esta subestação localiza-se no litoral do Ceará, uma região estratégica e altamente propensa à instalação de grandes *data centers* devido à infraestrutura de cabos submarinos de telecomunicação, que viabiliza a interconexão global de dados com outros países. A representação da rede básica e o local geográfico do PAC está indicado pela Figura 26.

Figura 26 - Representação da rede básica e do PAC



Fonte: Sintegre (2026)

5.4 Critérios normativos de avaliação

Os resultados obtidos nas simulações serão confrontados com os limites de distorção harmônica de tensão estabelecidos pela regulamentação aplicável aos acessos em alta tensão. A Tabela 5, extraída da ONS Submódulo 2.8 (2016), apresenta os limites individuais e globais de distorção harmônica para diferentes classes de tensão.

Tabela 5 - Limites individuais e globais de distorção harmônica de tensão aplicáveis às diferentes classes de tensão.

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par		DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥27	0,7%			≥27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95% = 1,5%			

Fonte: ONS Submódulo 2.8 (2016)

Para barramentos com tensão igual ou superior a 69 kV, caso do PAC em 230 kV analisado neste estudo, o limite individual para harmônicas ímpares entre a 3ª e a 25ª ordem é de 0,6%, enquanto para harmônicas pares o limite é de 0,3%. Já a distorção harmônica total de tensão admissível é de 1,5%. Esses valores constituem o referencial normativo adotado para a verificação da conformidade do empreendimento.

Para avaliar o comportamento do empreendimento e determinar a solução de filtragem adequada no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), o estudo foi estruturado em três etapas encadeadas de simulação:

- Primeira simulação (Cenário Base): Avaliação do complexo de data centers em sua configuração original, sem a presença de filtros harmônicos;
- Segunda simulação: Análise dos impactos decorrentes da inserção de um filtro passivo sintonizado na 11ª ordem harmônica para mitigar a violação inicial;
- Terceira simulação (e adequação final): Inserção e dimensionamento do filtro de 3ª ordem para correção dos fenômenos de ressonância paralela e enquadramento global nos limites regulatórios.

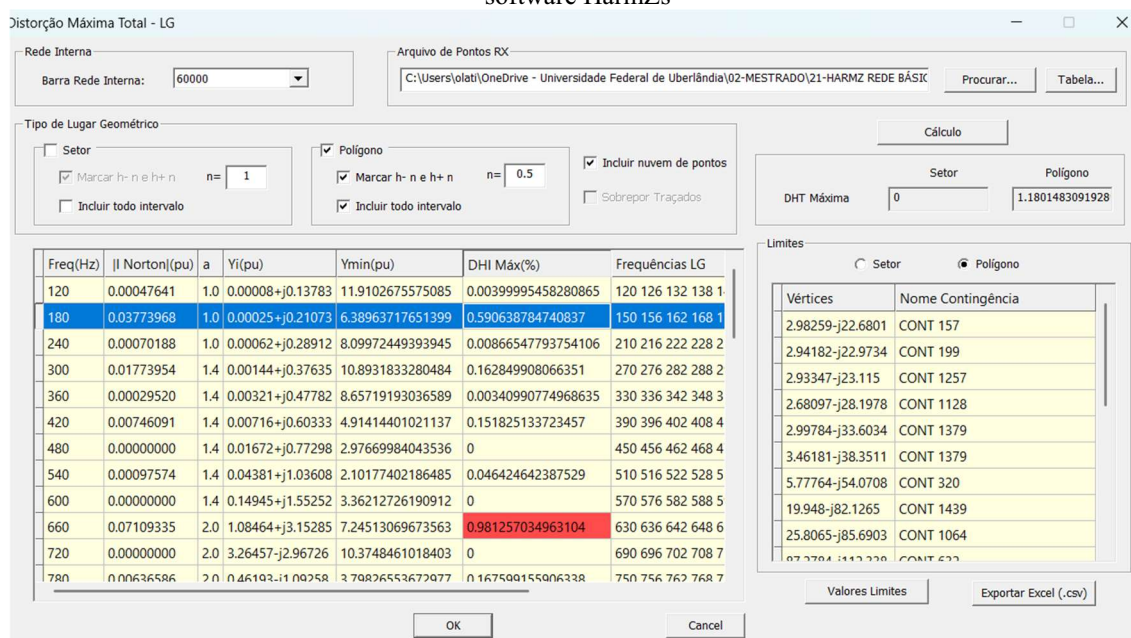
A seguir, apresentam-se detalhadamente os procedimentos e resultados referentes à primeira simulação realizada.

5.5 Resultados da primeira simulação

A primeira simulação foi realizada através do uso do software HarmZs, sem a presença de filtros harmônicos na Rede Interna, utilizando a modelagem unifilar do empreendimento, conforme apresentado na Figura 25, associada à nuvem de pontos da Subestação Pecém II.

Nessa condição, verificou-se que o sistema apresentou violação dos critérios de desempenho no PAC, conforme resultados apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Relação de distorções harmônicas máximas calculadas por frequência para o cenário base no software HarmZs



Fonte: Autoria própria.

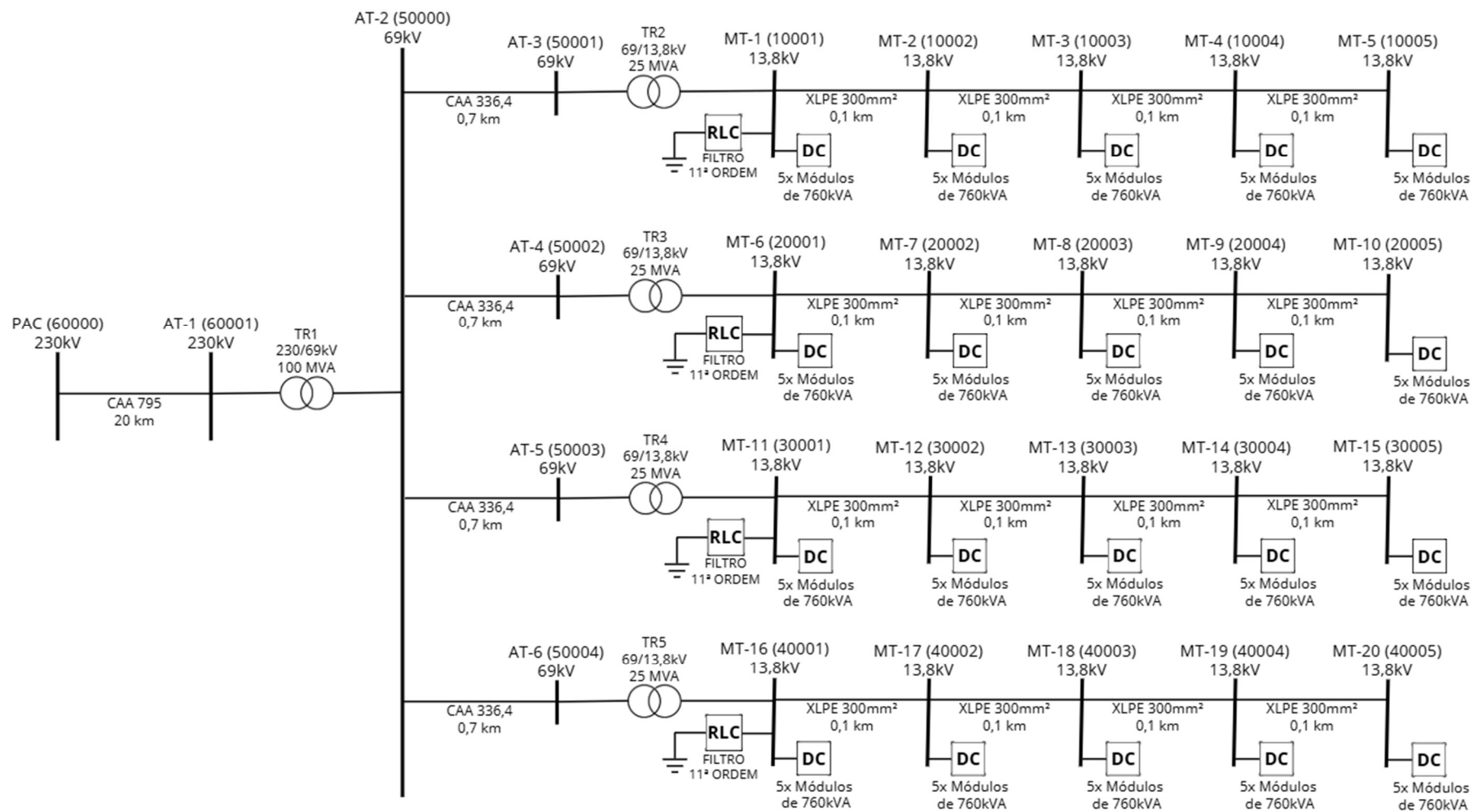
Os resultados obtidos no HarmZs indicaram, portanto, que a condição mais crítica ocorreu na 11ª ordem harmônica, cuja distorção individual de tensão atingiu valor superior ao limite normativo de 0,6% estabelecido para barramentos com tensão igual ou superior a 69 kV. Tal resultado, confrontado com os limites mostrados anteriormente na Tabela 5, evidencia que a instalação, em sua configuração original, não atenderia aos requisitos técnicos para acesso à Rede Básica.

Do ponto de vista físico, esse comportamento está associado à interação entre o espectro de correntes harmônicas emitidas pelos equipamentos eletrônicos do *data center* e a impedância equivalente da rede vista do PAC. Em especial, a 11ª ordem mostrou-se mais sensível à configuração harmônica do sistema, tornando-se a componente dominante no processo de violação.

5.6 Projeto do filtro passivo sintonizado para a 11ª ordem para a planta do *data center*

Diante da violação identificada no caso base, procedeu-se ao projeto de um filtro passivo sintonizado em derivação, instalado no barramento de 13,8 kV à jusante dos transformadores, conforme apresentado na Figura 28, com o objetivo de atenuar especificamente a 11^a ordem harmônica. O dimensionamento de um filtro RLC série conectado em shunt foi realizado utilizando o método descrito no livro Power System Harmonics (Watson, 2003).

Figura 28 - Representação da inserção do filtro harmônica de 11ª ordem nos barramentos de 13,8kV



Fonte: Autoria própria.

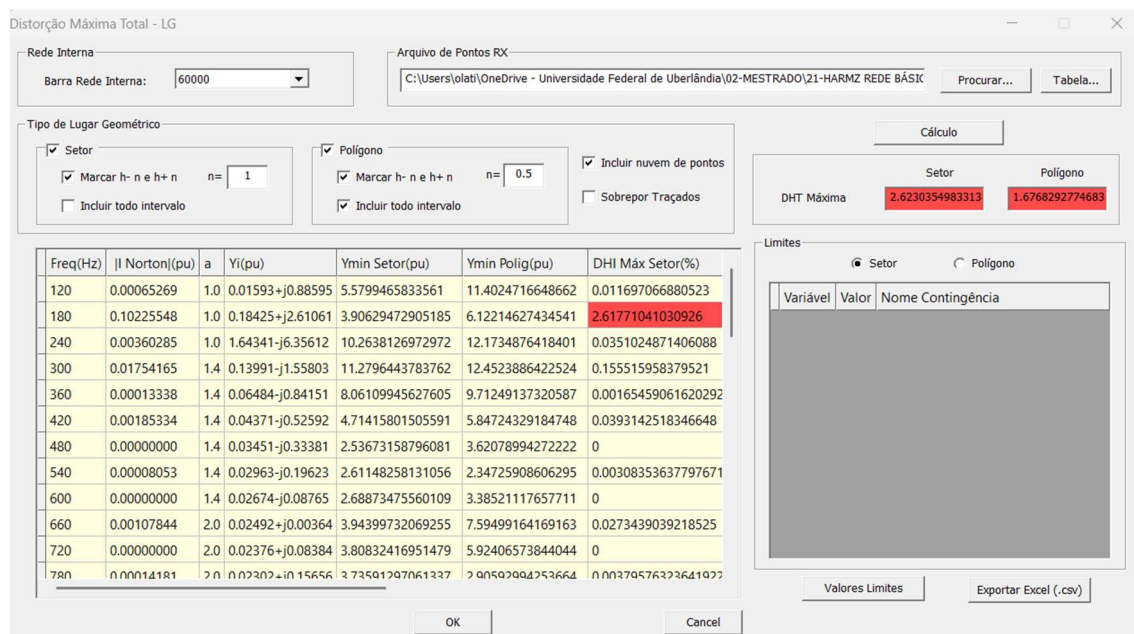
Nesse método, a primeira etapa consiste na definição da potência reativa do banco capacitivo na frequência fundamental, usualmente adotada como uma fração da potência do sistema. Em seguida, com base na tensão nominal do barramento e na potência reativa definida, calcula-se a reatância capacitiva e a capacitância do filtro. Posteriormente, determina-se a indutância necessária para que o ramo RLC apresente sintonia próxima da ordem harmônica de interesse. Por fim, a resistência é calculada a partir do fator de qualidade, responsável por definir a seletividade do filtro e sua largura de banda de atuação.

No presente estudo, foi adotada uma potência capacitiva para o BC (Banco de Capacitores) de 5% da potência do sistema, correspondente a 950 kVAr. O filtro foi projetado considerando um fator de qualidade igual a 40 e uma dessintonia de -0,15. Dessa forma, a frequência de sintonia real foi ajustada para valor ligeiramente inferior ao da ordem harmônica nominal, tal fator de dessintonia é comumente utilizado para garantir uma margem de segurança operacional contra variações paramétricas dos componentes do filtro e evitar sobrecarga do filtro.

5.7 Resultados da segunda simulação – com filtro de 11ª ordem

Após a inclusão do filtro sintonizado para a 11ª ordem, foi realizado novamente a simulação e apresentou-se então uma redução da componente harmônica inicialmente crítica, reconduzindo a distorção dessa ordem para níveis inferiores ao limite regulamentar. Contudo, a nova simulação revelou o surgimento de uma condição que infringiu os limites da 3ª ordem harmônica, cuja distorção individual atingiu aproximadamente 2,6%, conforme apresentado na Figura 29, ultrapassando novamente o limite de 0,6%.

Figura 29 - Relação de distorções harmônicas máximas calculadas por frequência para o cenário com filtro harmônico de 11ª ordem no software HarmZs



Fonte: Autoria própria.

Esse comportamento é gerado pela alteração da resposta em frequência da Rede Interna provocada pela inserção do filtro. Embora o ramo RLC tenha sido projetado para atuar de forma preferencial na 11ª ordem, sua presença também modifica a admitância equivalente da instalação em outras frequências. Como consequência, ocorre um deslocamento dos pontos naturais de ressonância do sistema.

No caso em análise, a introdução do filtro de 11ª ordem alterou o balanço entre os elementos indutivos e capacitivos do sistema. Esse rearranjo favoreceu o surgimento de uma condição de ressonância paralela nas proximidades da 3ª ordem. Assim, a mitigação da 11ª harmônica acabou, de forma indireta, ampliando a tensão harmônica na faixa da 3ª ordem.

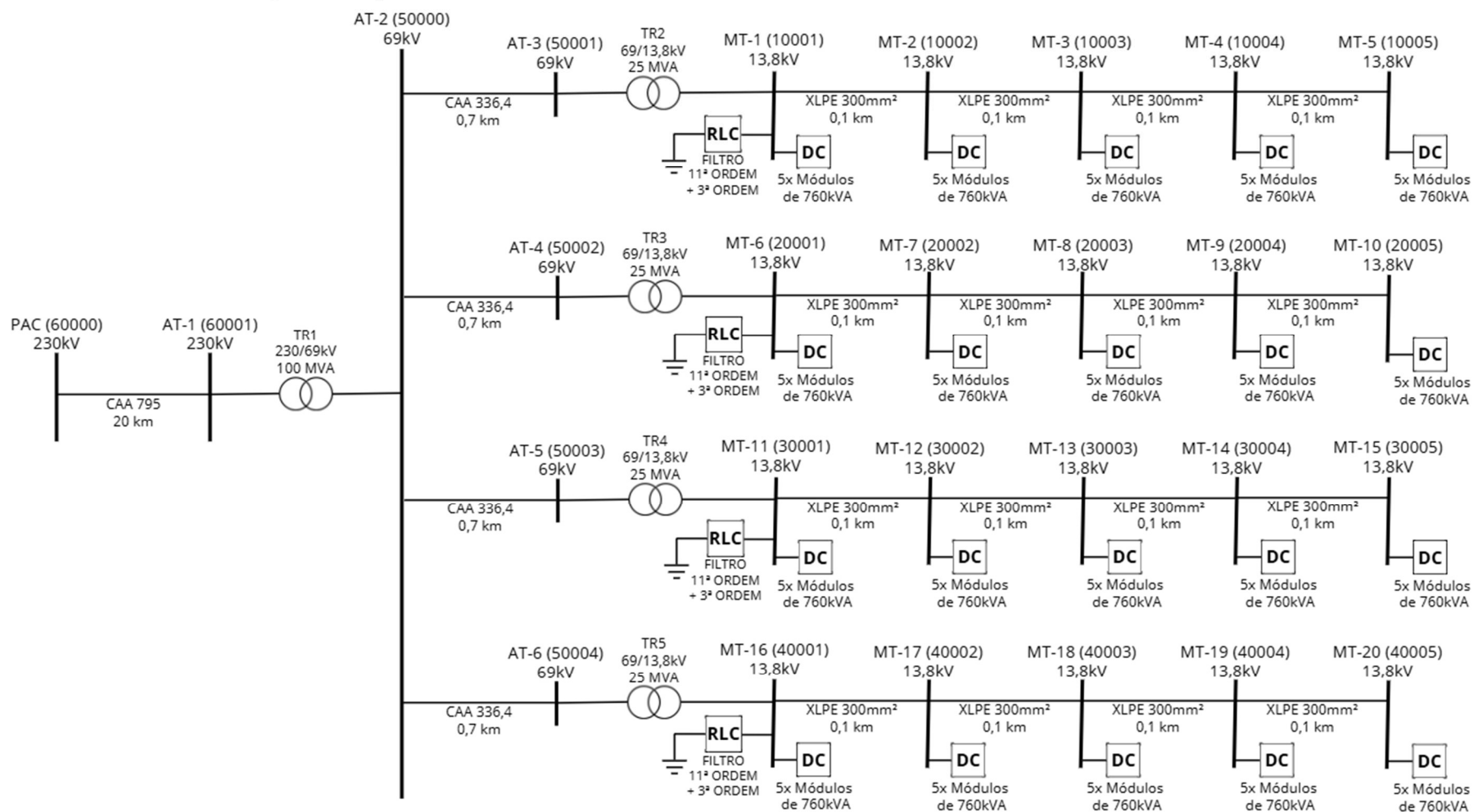
Esse resultado evidencia que o projeto de filtros harmônicos deve ser realizado de forma sistêmica. Em redes complexas, a correção de uma ordem específica pode modificar o perfil global de impedância da instalação e criar pontos de ressonância em outras frequências, o que exige reavaliação iterativa do desempenho após cada intervenção.

5.8 Projeto do filtro de 3ª ordem e adequação final

Para mitigar a amplificação observada na 3ª ordem harmônica, foi necessária a instalação de um segundo filtro passivo sintonizado, também em derivação no barramento de

13,8 kV, em paralelo ao filtro já existente. Inicialmente, esse segundo filtro foi dimensionado com potência de 5% da potência total da carga, correspondente a 950 kVAr, mantendo-se fator de qualidade igual a 40 e fator de dessintonia de 0,15, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Representação da inserção do filtro harmônica de 11ª ordem e de 3ª ordem nos barramentos de 13,8kV

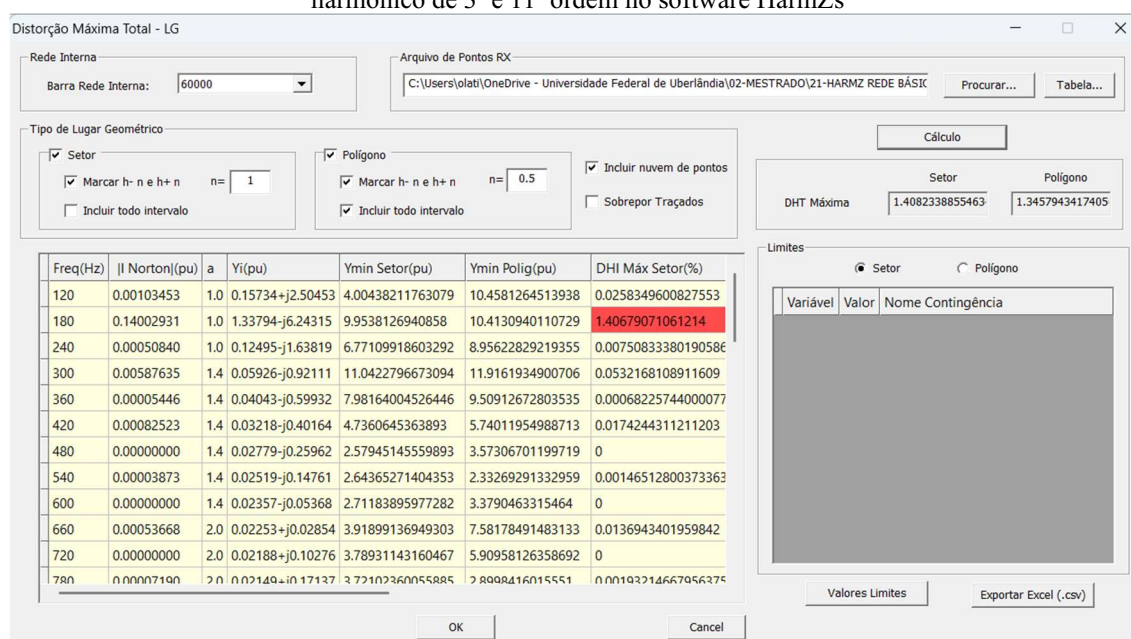


Fonte: Autoria própria.

5.9 Resultados da terceira simulação – com filtro de 11ª ordem e 3ª ordem

Tem-se que diante do apresentado na Figura 31, os resultados dessa configuração ainda indicaram violação da 3ª ordem em torno de 1,4%, permanecendo acima do limite admissível. Isso evidenciou que a potência reativa inicialmente adotada para o filtro da 3ª ordem não era suficiente para reconfigurar de modo adequado a resposta em frequência da Rede Interna e eliminar a condição de ressonância remanescente.

Figura 31 - Relação de distorções harmônicas máximas calculadas por frequência para o cenário com filtro harmônico de 3ª e 11ª ordem no software HarmZs

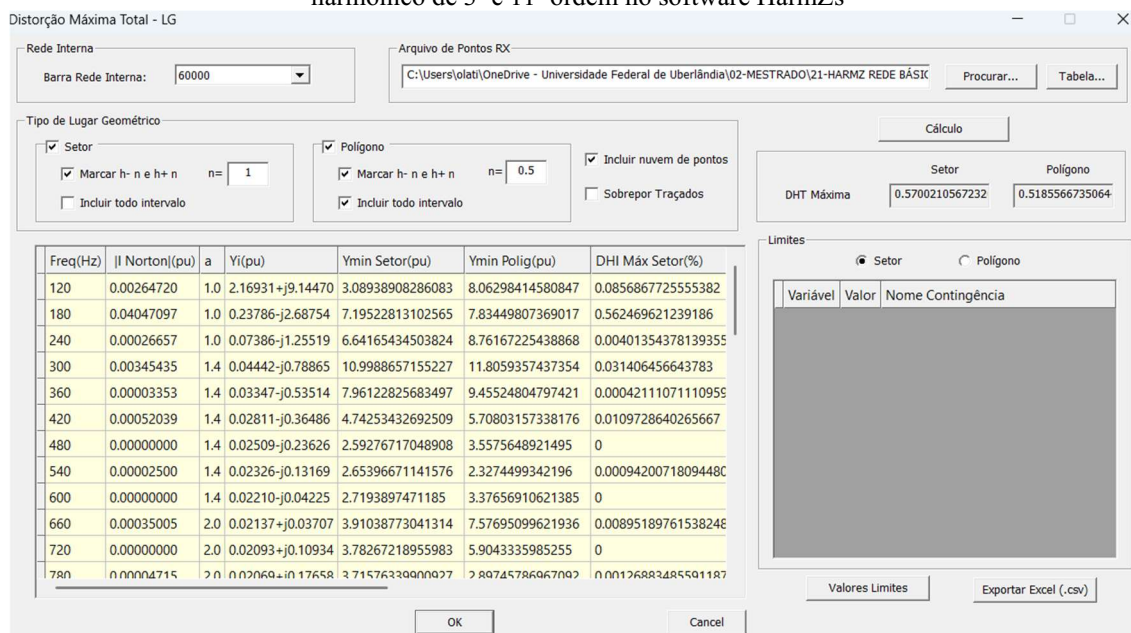


Fonte: Autoria própria.

5.10 Resultados da quarta simulação – com filtro de 11ª ordem e 3ª ordem com maior potência

Diante dos resultados anteriores, o filtro sintonizado na 3ª ordem foi redimensionado para 10% da potência da carga, correspondente a 1900 kVAr, mantendo-se o fator de qualidade de 40 e o fator de dessintonia de 0,15. Com essa nova configuração, a distorção harmônica individual da 3ª ordem foi reduzida para aproximadamente 0,56%, valor inferior ao limite normativo de 0,6%, caracterizando a conformidade do empreendimento no PAC, conforme resultados apresentados na Figura 32.

Figura 32 - Relação de distorções harmônicas máximas calculadas por frequência para o cenário com filtro harmônico de 3ª e 11ª ordem no software HarmZs



Fonte: Autoria própria.

Assim, a solução final passou a ser composta pela utilização de dois filtros passivos sintonizados em derivação: um ajustado para a 11ª ordem e outro para a 3ª ordem, sendo este último dimensionado com maior potência reativa para garantir a mitigação efetiva da distorção harmônica de tensão remanescente.

5.11 Consolidação dos resultados do estudo harmônico

Os resultados obtidos demonstram que a conexão do complexo de *data centers* à Rede Básica é tecnicamente viável, desde que sejam adotadas medidas adequadas de mitigação harmônica. Na configuração original, sem filtragem, verificou-se violação do limite individual da 11ª ordem harmônica. A instalação de um filtro sintonizado nessa ordem foi eficaz para a correção do problema inicial, porém alterou a resposta em frequência do sistema e provocou amplificação da 3ª ordem, em razão de fenômeno de ressonância.

A solução definitiva foi obtida com a instalação de um segundo filtro sintonizado na 3ª ordem, cujo redimensionamento para 1900 kVAr permitiu reduzir a distorção individual para 0,56%, enquadrando-a nos limites normativos estabelecidos pela regulamentação vigente. Desse modo, o estudo confirma a importância da abordagem prescrita pela NT 009/2016, baseada na representação da Rede Interna por equivalente de Norton e da Rede Externa por

Lugar Geométrico, para a identificação de condições críticas e para o dimensionamento adequado de medidas mitigadoras.

Cabe destacar que a modelagem da Rede Interna, abrangendo as especificações técnicas de barras, cabos, transformadores, capacitores e reatores, bem como as correntes harmônicas injetadas com seus respectivos módulos, ângulos e frequências, foi estruturada no software EditCEPEL, também desenvolvido pelo CEPEL. Essa ferramenta gera um arquivo de texto com extensão “.hzs”, o qual é empregado como dado de entrada pelo software HarmZs para a execução das simulações de fluxo de potência harmônico. Desse modo, a fim de proporcionar um maior detalhamento, o arquivo de texto utilizado na simulação do item 5.8, contemplando toda a topologia da rede interna e os filtros harmônicos projetados, encontra-se integralmente disponibilizado no Apêndice B.

De forma complementar, com o intuito de ilustrar o comportamento da análise do *data center* conectado à Rede Básica face às múltiplas condições operativas e de contingência analisadas, são apresentadas graficamente no Apêndice C as representações dos Lugares Geométricos obtidos no ambiente HarmZs, através da simulação do item 5.8.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar as distorções harmônicas associadas à operação de *data centers*, partindo da medição em campo de uma instalação real até a avaliação de acesso de um *data center* do tipo *hyperscale* à Rede Básica do Sistema Interligado Nacional. A pesquisa foi motivada pela crescente expansão desses empreendimentos, pelo aumento de relevante no consumo de energia elétrica e, especialmente, em razão da característica não linear deste tipo de carga, visto a existência em sua composição elétrica de equipamentos tais como *UPS* com retificadores e sistemas de climatização com inversores de frequência.

Inicialmente, foram realizadas campanhas de medição em campo em dois alimentadores representativos da instalação analisada, abrangendo, de um lado, a infraestrutura de tecnologia da informação e, de outro, os sistemas de climatização, iluminação e cargas auxiliares. Os resultados obtidos evidenciaram que o perfil de consumo do *data center* está associado à presença expressiva de cargas com comportamento não linear, resultando em emissões harmônicas características compatíveis com retificadores de 6 e 12 pulsos. A análise dos espectros medidos permitiu identificar as principais componentes harmônicas presentes, bem como consolidar parâmetros elétricos fundamentais para a etapa posterior de modelagem.

Na sequência, foi desenvolvida a modelagem computacional dos subsistemas do *data center* no ambiente MATLAB/Simulink, buscando reproduzir, de forma aderente, os níveis de potência, fator de potência e espectros harmônicos observados nas medições de campo. A estratégia adotada, baseada na decomposição das cargas em blocos equivalentes de retificadores, filtros e cargas lineares, garantiu a possibilidade de reproduzir o comportamento elétrico do empreendimento. Como resultado, obteve-se um modelo capaz de sintetizar o espectro de correntes harmônicas injetadas no barramento de média tensão, viabilizando sua utilização como base para estudos de maior escala.

A partir dessa modelagem validada, o trabalho avançou para a representação de um complexo de *data centers* do tipo *hyperscale*, cuja conexão à Rede Básica foi avaliada no

software HarmZs, em conformidade com a metodologia prescrita pela ONS NT 009/2016 (rev. 03). Nessa etapa, a Rede Interna foi representada por um equivalente de Norton e a Rede Externa por meio de um Lugar Geométrico das admitâncias harmônicas vistas do PAC, considerando diferentes cenários operativos da Rede Básica, inclusive situações degradadas sob critério N-1. Essa abordagem permitiu avaliar, de forma conservadora e tecnicamente fundamentada, os piores níveis de distorção harmônica de tensão associados ao acesso do empreendimento.

Os resultados do caso base indicaram que, na ausência de medidas mitigadoras, a conexão do complexo provocaria violação dos limites normativos de distorção harmônica no PAC, com destaque para a 11ª ordem harmônica. Esse resultado demonstrou que a agregação em larga escala de módulos com cargas eletrônicas típicas de *data centers* pode comprometer o desempenho da tensão na Rede Básica, tornando indispensável a adoção de soluções específicas de mitigação.

Com o objetivo de adequar o desempenho do empreendimento aos limites regulatórios, foi projetado e inserido um filtro passivo sintonizado para a 11ª ordem harmônica. Embora essa medida tenha sido eficaz para atenuar a componente inicialmente crítica, a nova configuração alterou a resposta em frequência da rede interna e favoreceu a amplificação da 3ª ordem harmônica, evidenciando a ocorrência de ressonância paralela. Tal comportamento reforça que o projeto de filtros harmônicos não pode ser conduzido de forma isolada por ordem individual, devendo considerar a interação global entre os elementos reativos e capacitivos da instalação, e a impedância equivalente da Rede Básica.

A solução final exigiu a inserção de um segundo filtro sintonizado para a 3ª ordem harmônica, inicialmente com potência de 5% da carga e, posteriormente, redimensionado para 10%, de modo a eliminar a violação remanescente. Com a atuação coordenada dos filtros de 11ª e 3ª ordem, foi possível reduzir a distorção harmônica individual da 3ª ordem para valor inferior ao limite normativo de 0,6%, assegurando o enquadramento técnico do empreendimento no PAC. Dessa forma, demonstrou-se que a conexão do complexo de *data centers* à Rede Básica é tecnicamente viável, desde que acompanhada por medidas adequadas de mitigação harmônica devidamente dimensionadas.

Como principal contribuição, este trabalho propôs uma abordagem integrada que articula três níveis de análise: medição em campo de instalação real, modelagem computacional representativa e estudo prospectivo de acesso em nível de Rede Básica. Essa integração confere relevância prática aos resultados, pois permite extrapolar, com fundamentação técnica, o comportamento harmônico de uma instalação real para cenários de maior porte e maior impacto

sistêmico. Além disso, o estudo contribui para a literatura nacional ao tratar especificamente da temática de QEE em *data centers*, assunto ainda pouco explorado sob a ótica de acesso à Rede Básica.

Do ponto de vista metodológico, os resultados confirmam a adequação do uso combinado do MATLAB/Simulink para representação das cargas não lineares e do HarmZs para avaliação do impacto harmônico no PAC segundo os critérios normativos do ONS. Também se evidenciou a importância da metodologia baseada em equivalente de Norton e Lugar Geométrico, capaz de capturar a variabilidade da Rede Externa e identificar cenários críticos de amplificação de tensão que não seriam adequadamente representados por uma impedância fixa.

Como limitações do trabalho, destaca-se que a modelagem das correntes harmônicas das cargas foi construída a partir das medições realizadas em um único *data center*, sendo posteriormente escalonada para representar um complexo *hyperscale*. Embora esse procedimento seja tecnicamente justificável para fins de análise prospectiva, diferentes arquiteturas elétricas, tecnologias de *UPS*, estratégias de climatização e políticas operativas podem alterar o espectro de emissão harmônica de outros empreendimentos. Além disso, o estudo concentrou-se no regime permanente e na distorção harmônica, não contemplando, em profundidade, outros indicadores de QEE, como flutuação de tensão, transitórios e desequilíbrio impactando diretamente na Rede Básica.

Como desdobramentos futuros, recomenda-se a ampliação da base experimental com medições em diferentes tipologias de *data centers*, incluindo instalações de maior porte e com maior diversidade tecnológica. Também se mostra relevante investigar alternativas mitigadoras além dos filtros passivos sintonizados, como filtros híbridos e filtros ativos, bem como aprofundar a análise do impacto harmônico em cenários com geração local e armazenamento de energia através de *BESS*. Adicionalmente, estudos futuros podem incorporar avaliações econômicas e comparativas entre soluções de mitigação, de forma a apoiar a tomada de decisão em projetos de acesso de grandes consumidores não lineares. Por fim, destaca-se a relevância do desenvolvimento de uma normativa técnica específica para o estabelecimento e padronização das correntes certificadas aplicáveis a plantas de data center, considerando suas particularidades operacionais, a diversidade de equipamentos não lineares e seus impactos harmônicos sobre os sistemas elétricos de potência.

Em síntese, conclui-se que *data centers* constituem cargas com potencial efetivo de impacto sobre a QEE, especialmente quando agregados em complexos de elevada potência e conectados diretamente à Rede Básica. Os resultados obtidos mostram que a avaliação

harmônica desses empreendimentos deve ser conduzida com rigor metodológico e aderência normativa, de modo a garantir que sua expansão ocorra de forma tecnicamente compatível com os requisitos de desempenho do sistema elétrico conforme estabelecidos pela ONS NT 009/2016 (rev. 03). Nesse contexto, o trabalho demonstra que a combinação entre diagnóstico em campo, modelagem computacional e estudo de acesso representa uma estratégia consistente para subsidiar o planejamento e a integração segura de futuros complexos de *data centers* ao sistema elétrico brasileiro.

REFERÊNCIAS

AAMIR, Muhammad; AHMED KALWAR, Kafeel; MEKHILEF, Saad. Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1395–1410, 1 maio 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.335>

ABNT. ABNT NBR IEC 61400-21: Turbinas eólicas - Parte 21: Medição e avaliação das características da qualidade da energia de aerogeradores conectados à rede. **NBR IEC 601400-21: Turbinas eólicas - Parte 21**, p. 57, fev. 2022.

AHMED, Kazi Main Uddin *et al.* **Electrical Energy Consumption Model of Internal Components in Data Centers**. [S.l.: S.n.].

AHMED, Kazi Main Uddin; ALVAREZ, Manuel; BOLLEN, Math H. J. Reliability Analysis of Internal Power Supply Architecture of Data Centers in Terms of Power Losses. **Electric Power Systems Research**, v. 193, p. 107025, 1 abr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107025>

ALKRUSH, Ahmed A. *et al.* Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions. **International Journal of Refrigeration**, v. 160, p. 246–262, 1 abr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.02.007>

ALVES, Guilherme Vasconcellos *et al.* Análise comparativa da eficiência energética em sistemas de climatização: integração entre aspectos elétricos e mecânicos. **REVISTA DELOS**, v. 18, n. 75, p. e7745–e7745, 1 dez. 2025. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n75-003>

ANEEL. Prodist Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. n. Rev 12, 1 jan. 2021.

CAPOZZOLI, Alfonso; PRIMICERI, Giulio. Cooling Systems in Data Centers: State of Art and Emerging Technologies. **Energy Procedia**, Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of the 7th International Conference SEB-15. v. 83, p. 484–493, 1 dez. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.168>

CHLORIDE GROUP PLC. **Chloride 90-NET from 250 to 800 kVA: UPS Catalogue**. [S.l.]: Chloride Group PLC, 2008.

Data centres & networks. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>>. Acesso em: 30 set. 2025.

DUGAN, Roger C. *et al.* **Electrical Power Systems Quality**. [S.l.]: McGraw Hill Professional, 2002.

EVANS, Tony. The Different Technologies for Cooling Data Centers. 02. v. 59, n. White Paper, mar. 2014.

Explicando os motores EC: como eles podem tornar nossa vida mais fácil. Portal EA, 24 mar. 2021. Disponível em: <<https://www.engenhariaarquitectura.com.br/2021/03/explicando-os-motores-ec-como-eles-podem-tornar-nossa-vida-mais-facil>>. Acesso em: 11 maio. 2026

FANG, Hui *et al.* Ripple-reduced model predictive direct power control for active front-end power converters with extended switching vectors and time-optimised control. **IET Power Electronics**, v. 9, n. 9, p. 1914–1923, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.0857>

FLUKE. **Analizador de Qualidade de Energia Fluke 435 Série II.**, 12 maio 2026. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/analisadores-da-qualidade-de-energia/434-435>

HUSSEIN A. KAZEM. Harmonic Mitigation Techniques Applied to Power Distribution Networks. **ResearchGate**, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/591680>

IEEE 519-2022. **IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems**, p. 1–31, ago. 2022.

KAMIYA, George; COROAMĂ, Vlad C. Data Centre Energy Use: Critical Review of Models and Results. **IEA 4E TCP**, mar. 2025.

KOOT, Martijn; WIJNHOFEN, Fons. Usage impact on data center electricity needs: A system dynamic forecasting model. **Applied Energy**, v. 291, p. 116798, 1 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116798>

LIN, Liuzixuan *et al.* Exploding AI Power Use: an Opportunity to Rethink Grid Planning and Management. *In*: 4 jun. 2024. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/2311.11645>. Acesso em: 2 dez. 2025

NASSIF, Alexandre B.; WANG, Yang; RAHIMI PORDANJANI, Iraj. Power Quality Characteristics and Electromagnetic Compatibility of Modern Data Centres. *In*: 2018 IEEE CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL & COMPUTER ENGINEERING (CCECE). **2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE)**. maio 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8447607/>. Acesso em: 13 jan. 2026. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2018.8447607>

NIEWENHUIS, Dante *et al.* FootPrinter: Quantifying Data Center Carbon Footprint. *In*: ICPE '24 Companion. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 7 maio 2024. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3629527.3651419>. Acesso em: 30 set. 2025

ONS NT 009/2016. **Instruções para realização de estudos e medições de qee relacionados aos acessos à rede básica ou aos barramentos de fronteira com a rede básica para parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras**, n. Rev. 03, p. 1–96, abr. 2019.

ONS Submódulo 2.8. **Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica**, n. 2016.12, dez. 2016.

RALEIGH, HARVEY EURE Schneider Electric. **Curbing Harmonics in HVAC Systems**. Disponível em: <https://www.hpac.com/motors-drives/article/20926846/curbing-harmonics-in-hvac-systems>. Acesso em: 11 maio. 2026.

SINTEGRE. **ONS - Diagrama de Rede de Operação e Áreas Elétricas do ONS.**, 2 jun. 2026. Disponível em: https://sintegre.ons.org.br/sites/4/50/Produtos/515/08-12-2025_111000/Diagrama%20COSR%20Nordeste/DU-CT.NE-GEO.01_r11.pdf. Acesso em: 2 jun. 2026

SUNKARA, Krishna Chaitanya; NARUKULLA, Krishnaiah. Power Consumption and Heat Dissipation in AI Data Centers: A Comparative Analysis. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 14, n. 02, 20 fev. 2025. <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2025.1402015>

TEIXEIRA, Douglas Angelo. Análise das distorções harmônicas: estudo de caso de um sistema industrial. 12 nov. 2009.

WANG, Di *et al.* ACE: Abstracting, characterizing and exploiting datacenter power demands. *In*: 2013 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WORKLOAD CHARACTERIZATION (IISWC). **2013 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC)**. set. 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6704669>>. Acesso em: 1 out. 2025 <https://doi.org/10.1109/IISWC.2013.6704669>

WATSON, Neville R. **Power System Harmonics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003.

XU, Wilsun; LIU, Xian; LIU, Yilu. An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 18, p. 214–219, 1 fev. 2003.

ZUBI, Hazem; KHALIFA, Salem. Power quality investigation of a typical Telecom data centre electrical network. *In*: 2016 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL ENGINEERING & INFORMATION TECHNOLOGY (CEIT). **2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)**. dez. 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7929128/>>. Acesso em: 13 jan. 2026 <https://doi.org/10.1109/CEIT.2016.7929128>

APÊNDICE A

Com o objetivo de garantir a reprodutibilidade dos resultados obtidos nesta pesquisa e incentivar o desenvolvimento de futuros estudos de qualidade da energia em data centers, o modelo computacional desenvolvido no ambiente MATLAB/Simulink foi disponibilizado em repositório público na biblioteca da MathWorks (MATLAB Central File Exchange).

Maiores detalhes da simulação, parâmetros dos componentes elétricos (UPS e HVAC) e os arquivos de código .slx podem ser verificados e baixados diretamente através dos dados abaixo:

- **Título da Publicação:** *Data Center Harmonic Distortion Model in MATLAB/Simulink*
- **Identificador do Pacote:** DataCenterHarmonicModel
- **Link de Acesso:** <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/184274-data-center-harmonic-distortion-model-in-matlab-simulink>

APÊNDICE B

Este apêndice apresenta o script utilizado para a modelagem da rede interna desenvolvido no software EditCEPEL e implementado no software HarmZs, conforme apresentado no item 5.8.

#VERSAO 1.9

DGERAIS

FREQUENCIA 60

SBASE 100

DADOS PU

INTERFACE PU

METODOLOGIA YS

TITULO DISSERTACAO

IDBARRA NUMERO

FIM

DGBT

%	Grupo	Tensão(kV)
---	-------	------------

1	230
---	-----

2	69
---	----

3	13.8
---	------

FIM

DARE

%	Area	Nome
---	------	------

1	AREA
---	------

FIM

DFCF

%	Ident	Modelo	Alfa	Beta	A	B	C
1	1	0.7316	0.7158	-1.243	1.549	0.6	
2	1	1.909	1.5	0.1431	-0.08121	0.91	
3	1	0.8802	0.8069	-0.8222	1.37	0.6	

FIM

DBAR

%	Num	Nome	Tensao	Angulo	Base	Area
60000	"PAC"	1	0	1	1	
60001	"AT-1"	1	0	1	1	
50000	"AT-2"	1	0	2	1	
50001	"AT-3"	1	0	2	1	
50002	"AT-4"	1	0	2	1	
50003	"AT-5"	1	0	2	1	
50004	"AT-6"	1	0	2	1	
10001	"MT-1"	1	0	3	1	
10002	"MT-2"	1	0	3	1	
10003	"MT-3"	1	0	3	1	
10004	"MT-4"	1	0	3	1	
10005	"MT-5"	1	0	3	1	
20001	"MT-6"	1	0	3	1	
20002	"MT-7"	1	0	3	1	
20003	"MT-8"	1	0	3	1	
20004	"MT-9"	1	0	3	1	
20005	"MT-10"	1	0	3	1	
30001	"MT-11"	1	0	3	1	
30002	"MT-12"	1	0	3	1	
30003	"MT-13"	1	0	3	1	
30004	"MT-14"	1	0	3	1	

30005	"MT-15"	1	0	3	1
40001	"MT-16"	1	0	3	1
40002	"MT-17"	1	0	3	1
40003	"MT-18"	1	0	3	1
40004	"MT-19"	1	0	3	1
40005	"MT-20"	1	0	3	1

FIM

DLIN

% De	Para Circ Est	Resistencia	Reatancia	Suscep/Capac	Comprimento	PI	Identificador
60000	60001	1	1 0.000136	0.000756	0.001904	20	0 1
50000	50001	1	1 0.003571	0.008822	0.000143	0.7	0 1
50000	50002	1	1 0.003571	0.008822	0.000143	0.7	0 1
50000	50003	1	1 0.003571	0.008822	0.000143	0.7	0 1
50000	50004	1	1 0.003571	0.008822	0.000143	0.7	0 1
10001	10002	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
10002	10003	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
10003	10004	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
10004	10005	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
20001	20002	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
20002	20003	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
20003	20004	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
20004	20005	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
30001	30002	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
30002	30003	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
30003	30004	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
30004	30005	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
40001	40002	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
40002	40003	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
40003	40004	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1
40004	40005	1	1 0.011132	0.011939	0.001046	0.25	0 1

FIM

DTR2

% De	Tensao_De	Ang_De	Para	Tensao_Para	Ang_Para	Resistencia	Reatancia
S_Base Circ Est Identificador							
60001	1	0	50000	2	0	0.0033	0.12 100 1
1	2						
50001	2	0	10001	3	0	0.0060	0.09 25 1
1	2						
50002	2	0	20001	3	0	0.0060	0.09 25 1
1	2						
50003	2	0	30001	3	0	0.0060	0.09 25 1
1	2						

FIM

DEQP

% De	Para Circ Est	Resistencia	Reatancia	Suscep/Capac	Lig
% Filtro RLC 3ª ordem					
10001	0 1 1	0.46168	0.00234	0.0195	s
20001	0 1 1	0.46168	0.00234	0.0195	s
30001	0 1 1	0.46168	0.00234	0.0195	s
40001	0 1 1	0.46168	0.00234	0.0195	s

% Filtro RLC 11ª ordem

10001	0 1 1	0.24245	0.00008070	0.0095	s
20001	0 1 1	0.24245	0.00008070	0.0095	s
30001	0 1 1	0.24245	0.00008070	0.0095	s
40001	0 1 1	0.24245	0.00008070	0.0095	s

FIM

DSRC

% De Para Tipo Circ Est

10001	0	I	1	1
%	Freq	Módulo	Ângulo	
120	0.00001026	0		
180	0.00078052	0		
240	0.00001368	0		
300	0.000690987782915681		315	
360	1.03168314810327E-05		0	
420	0.000225770661015158		315	
540	0.000018474326140454		135	
660	0.000694039723128295		135	
780	0.000129665109879258		135	
1020	4.99627028892553E-05		0	
1380	9.48271707898111E-05		0	
1500	1.75039401278684E-05		0	
1740	8.4970583144992E-06		0	
2100	2.83801747704273E-05		0	
2820	8.07220539877424E-06		0	

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

10002	0	I	1	1
%	Freq	Módulo	Ângulo	
120	0.00001026	0		
180	0.00078052	0		
240	0.00001368	0		
300	0.000690987782915681		315	
360	1.03168314810327E-05		0	
420	0.000225770661015158		315	
540	0.000018474326140454		135	
660	0.000694039723128295		135	
780	0.000129665109879258		135	
1020	4.99627028892553E-05		0	
1380	9.48271707898111E-05		0	
1500	1.75039401278684E-05		0	
1740	8.4970583144992E-06		0	
2100	2.83801747704273E-05		0	
2820	8.07220539877424E-06		0	

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

10003	0	I	1	1
%	Freq	Módulo	Ângulo	
120	0.00001026	0		
180	0.00078052	0		
240	0.00001368	0		
300	0.000690987782915681		315	
360	1.03168314810327E-05		0	
420	0.000225770661015158		315	
540	0.000018474326140454		135	
660	0.000694039723128295		135	
780	0.000129665109879258		135	
1020	4.99627028892553E-05		0	
1380	9.48271707898111E-05		0	
1500	1.75039401278684E-05		0	
1740	8.4970583144992E-06		0	
2100	2.83801747704273E-05		0	
2820	8.07220539877424E-06		0	

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

10004	0	I	1	1
%	Freq	Módulo	Ângulo	
120	0.00001026	0		

180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0
1380	9.48271707898111E-05		0
1500	1.75039401278684E-05		0
1740	8.4970583144992E-06		0
2100	2.83801747704273E-05		0
2820	8.07220539877424E-06		0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

10005 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0
1380	9.48271707898111E-05		0
1500	1.75039401278684E-05		0
1740	8.4970583144992E-06		0
2100	2.83801747704273E-05		0
2820	8.07220539877424E-06		0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

20001 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0
1380	9.48271707898111E-05		0
1500	1.75039401278684E-05		0
1740	8.4970583144992E-06		0
2100	2.83801747704273E-05		0
2820	8.07220539877424E-06		0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

20002 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315

360	1.03168314810327E-05	0
420	0.000225770661015158	315
540	0.000018474326140454	135
660	0.000694039723128295	135
780	0.000129665109879258	135
1020	4.99627028892553E-05	0
1380	9.48271707898111E-05	0
1500	1.75039401278684E-05	0
1740	8.4970583144992E-06	0
2100	2.83801747704273E-05	0
2820	8.07220539877424E-06	0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

20003 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0
1380	9.48271707898111E-05		0
1500	1.75039401278684E-05		0
1740	8.4970583144992E-06		0
2100	2.83801747704273E-05		0
2820	8.07220539877424E-06		0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

20004 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0
1380	9.48271707898111E-05		0
1500	1.75039401278684E-05		0
1740	8.4970583144992E-06		0
2100	2.83801747704273E-05		0
2820	8.07220539877424E-06		0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

20005 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135

660	0.000694039723128295	135
780	0.000129665109879258	135
1020	4.99627028892553E-05	0
1380	9.48271707898111E-05	0
1500	1.75039401278684E-05	0
1740	8.4970583144992E-06	0
2100	2.83801747704273E-05	0
2820	8.07220539877424E-06	0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

30001 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0
1380	9.48271707898111E-05		0
1500	1.75039401278684E-05		0
1740	8.4970583144992E-06		0
2100	2.83801747704273E-05		0
2820	8.07220539877424E-06		0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

30002 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0
1380	9.48271707898111E-05		0
1500	1.75039401278684E-05		0
1740	8.4970583144992E-06		0
2100	2.83801747704273E-05		0
2820	8.07220539877424E-06		0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

30003 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0

1380	9.48271707898111E-05	0
1500	1.75039401278684E-05	0
1740	8.4970583144992E-06	0
2100	2.83801747704273E-05	0
2820	8.07220539877424E-06	0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

30004 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0
1380	9.48271707898111E-05		0
1500	1.75039401278684E-05		0
1740	8.4970583144992E-06		0
2100	2.83801747704273E-05		0
2820	8.07220539877424E-06		0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

30005 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0
1380	9.48271707898111E-05		0
1500	1.75039401278684E-05		0
1740	8.4970583144992E-06		0
2100	2.83801747704273E-05		0
2820	8.07220539877424E-06		0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

40001 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0	
180	0.00078052	0	
240	0.00001368	0	
300	0.000690987782915681		315
360	1.03168314810327E-05		0
420	0.000225770661015158		315
540	0.000018474326140454		135
660	0.000694039723128295		135
780	0.000129665109879258		135
1020	4.99627028892553E-05		0
1380	9.48271707898111E-05		0
1500	1.75039401278684E-05		0
1740	8.4970583144992E-06		0

2100	2.83801747704273E-05	0
2820	8.07220539877424E-06	0
FIMP		
% De	Para Tipo Circ Est	
40002	0 I 1 1	
% Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0
180	0.00078052	0
240	0.00001368	0
300	0.000690987782915681	315
360	1.03168314810327E-05	0
420	0.000225770661015158	315
540	0.000018474326140454	135
660	0.000694039723128295	135
780	0.000129665109879258	135
1020	4.99627028892553E-05	0
1380	9.48271707898111E-05	0
1500	1.75039401278684E-05	0
1740	8.4970583144992E-06	0
2100	2.83801747704273E-05	0
2820	8.07220539877424E-06	0

FIMP		
% De	Para Tipo Circ Est	
40003	0 I 1 1	
% Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0
180	0.00078052	0
240	0.00001368	0
300	0.000690987782915681	315
360	1.03168314810327E-05	0
420	0.000225770661015158	315
540	0.000018474326140454	135
660	0.000694039723128295	135
780	0.000129665109879258	135
1020	4.99627028892553E-05	0
1380	9.48271707898111E-05	0
1500	1.75039401278684E-05	0
1740	8.4970583144992E-06	0
2100	2.83801747704273E-05	0
2820	8.07220539877424E-06	0

FIMP		
% De	Para Tipo Circ Est	
40004	0 I 1 1	
% Freq	Módulo	Ângulo
120	0.00001026	0
180	0.00078052	0
240	0.00001368	0
300	0.000690987782915681	315
360	1.03168314810327E-05	0
420	0.000225770661015158	315
540	0.000018474326140454	135
660	0.000694039723128295	135
780	0.000129665109879258	135
1020	4.99627028892553E-05	0
1380	9.48271707898111E-05	0
1500	1.75039401278684E-05	0
1740	8.4970583144992E-06	0
2100	2.83801747704273E-05	0
2820	8.07220539877424E-06	0

FIMP

% De Para Tipo Circ Est

40005 0 I 1 1

%	Freq	Módulo	Ângulo
120		0.00001026	0
180		0.00078052	0
240		0.00001368	0
300		0.000690987782915681	315
360		1.03168314810327E-05	0
420		0.000225770661015158	315
540		0.000018474326140454	135
660		0.000694039723128295	135
780		0.000129665109879258	135
1020		4.99627028892553E-05	0
1380		9.48271707898111E-05	0
1500		1.75039401278684E-05	0
1740		8.4970583144992E-06	0
2100		2.83801747704273E-05	0
2820		8.07220539877424E-06	0

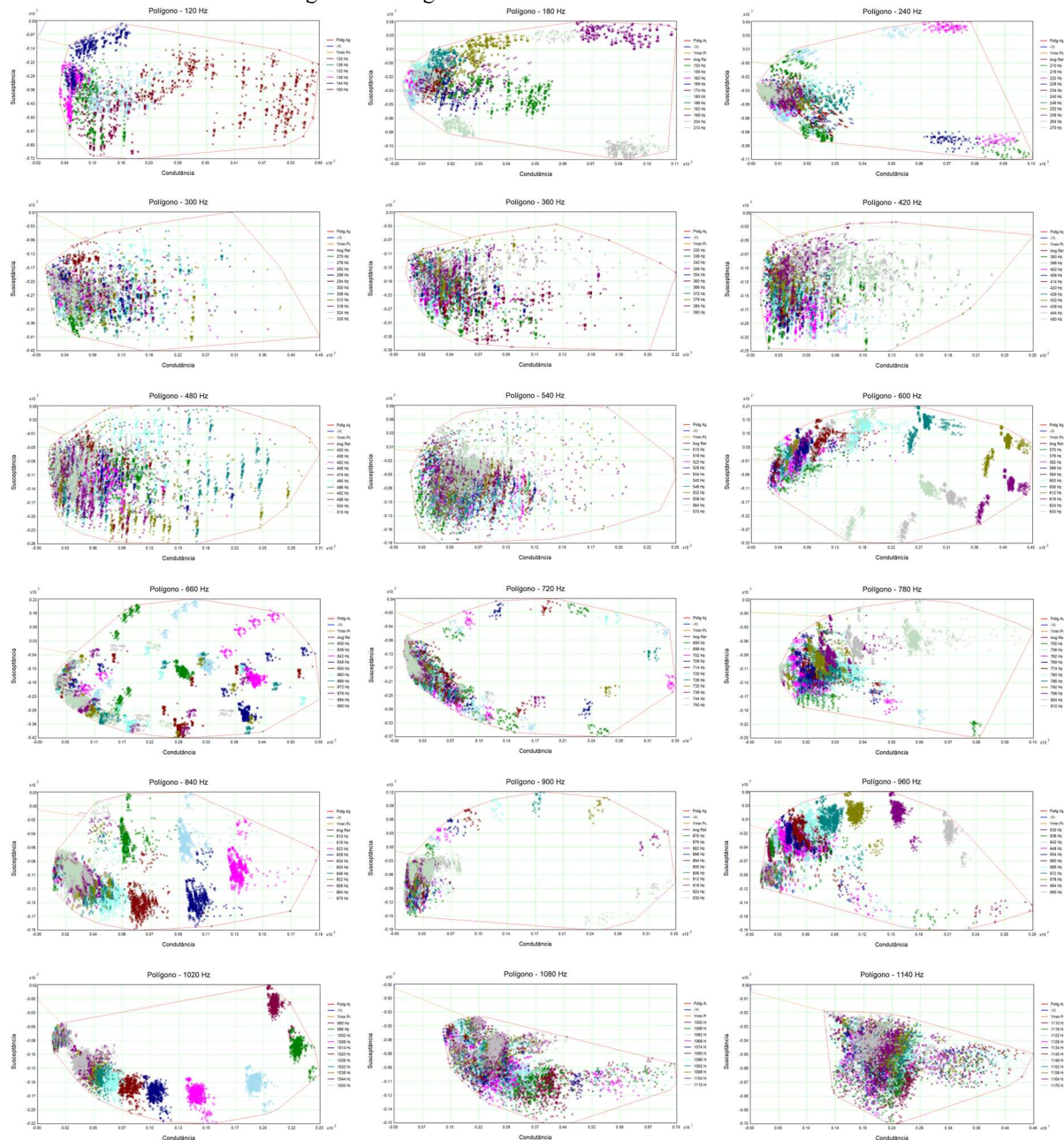
FIMP

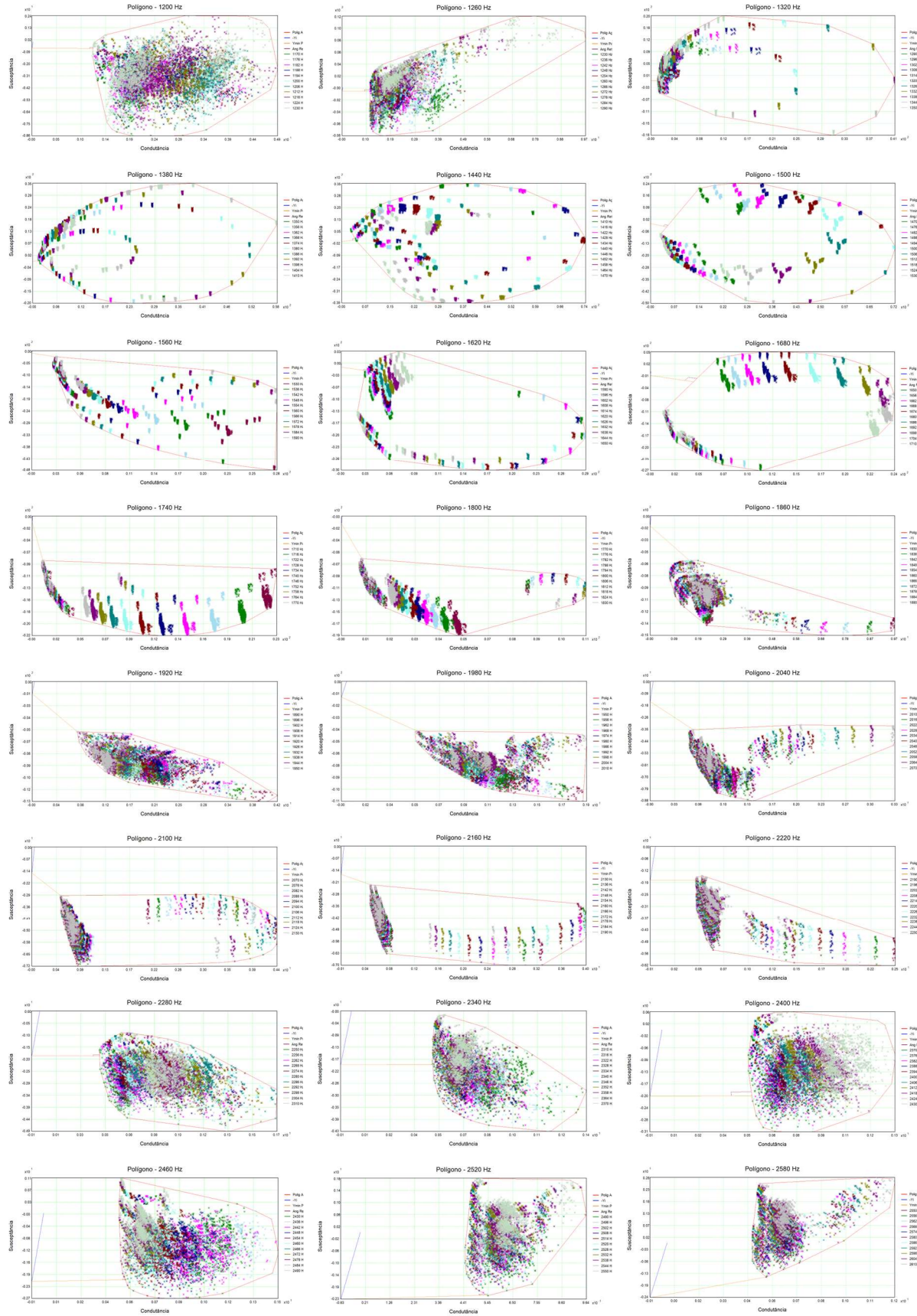
FIM

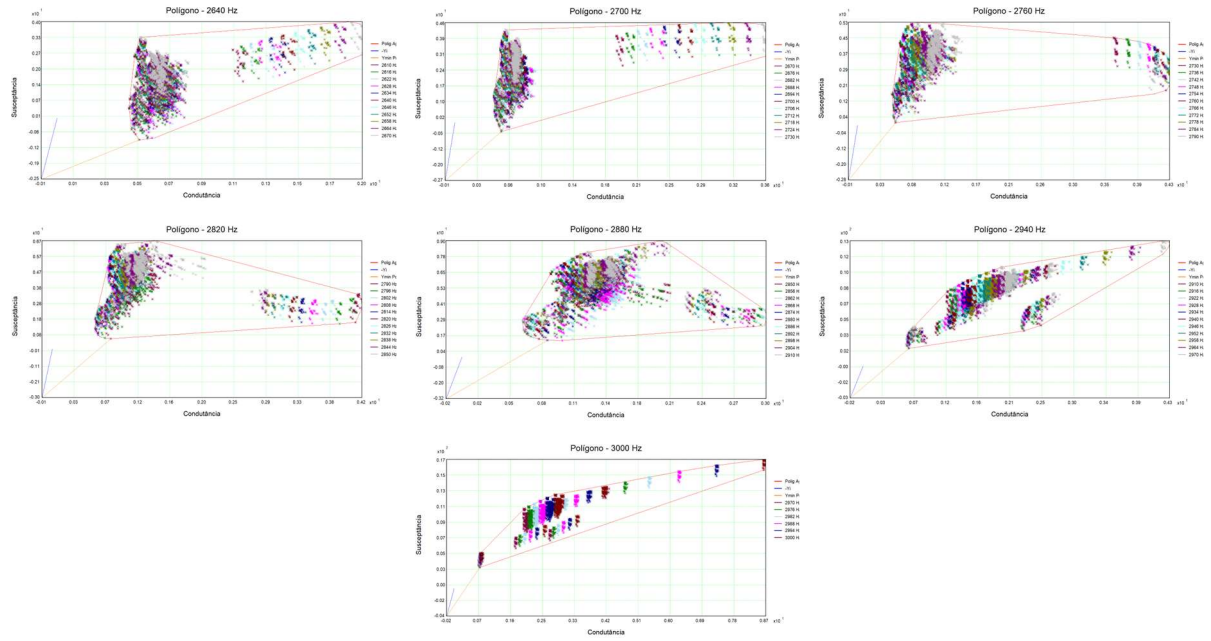
APÊNDICE C

Este apêndice apresenta os Lugares Geométricos correspondentes a todas as ordens harmônicas do espectro estabelecido pelas normativas, abrangendo da 2ª à 50ª ordem, conforme simulação apresentada no item 5.8.

Figura 33 - Lugares Geométricos da 2ª à 50ª ordem







Fonte: Autoria própria.